

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

# PROJEKT MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY PRO KONKRÉTNÍ LOKALITU

DESIGN OF SMALL HYDROPOWER PLANT FOR SPECIFIC LOCATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. FRANTIŠEK PAŠTĚKA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. JAROSLAV ŠTIGLER, Ph.D.

BRNO 2009

**ZDE BUDE ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (JE PŘILOŽENO K TISKU)**

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce je zaměřena na projektování malé vodní elektrárny pro konkrétní lokalitu. V práci by měla být navržena vhodná turbína pro zjištěné parametry na dané lokalitě, dále pak vytvořena základní projektová dokumentace MVE se všemi zařízeními a použitými principy, tak aby elektrárna byla plně funkční. Dále by měl být proveden výpočet proudění v přivaděči na turbínu a posouzen vliv tvaru přivaděče na toto proudění.

## **Abstract**

This master's thesis is specialised in designing of small hydropower plant for specific location. In work should be designed suitable turbine for parameters found on the site, then created a basic project documentation of small hydropower plant with all devices and used principles, so that the plant would be capable of operation. In the next part of thesis should be extended the calculation of flow in the turbine delivery and assessed effect of geometry of turbine delivery on the flow.

## **Klíčová slova**

Malá vodní elektrárna, nízký spád, přivaděč, Vírová turbína, Kaplanova turbína, Bánkiho turbína, savka, proudění, projektová dokumentace.

## **Key words**

Small hydropower plant, low gradient, delivery, Swirl turbine, Kaplan turbine, Banki turbine, suction pipe, flow, project documentation.

### **Bibliografická citace dle ČSN ISO 690**

PAŠTĚKA, F. *Projekt malé vodní elektrárny pro konkrétní lokalitu..* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 79 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Štigler, Ph.D.

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce pana doc. Ing. Jaroslava Štiglera, Ph.D a s použitím svých znalostí, odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 24.5.2009

.....  
Podpis

## **Poděkování**

Za rady, pomoc a cenné připomínky při zpracování diplomové práce tímto děkuji vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Jaroslavu Štiglerovi, Ph.D. Poděkovat bych chtěl také své rodině za podporu, kterou mi věnovali po celou dobu mého studia.

## OBSAH

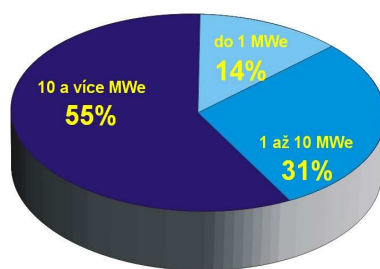
Obsah.....	7
1 Úvod.....	8
1.1 Problematika vodních elektráren.....	8
2 Určení základních parametrů lokality .....	10
2.1 Současný stav dané lokality .....	10
2.2 Určení optimálního průtoku .....	11
2.2.1 Určení průtoku v přívodu metodou obdélníkového přepadu .....	13
2.2.2 Určení průtoku v řece Dědina pomocí dat z ČHMU.....	14
2.2.3 Optimální průtok .....	16
2.3 Určení hrubého a čistého spádu .....	17
2.3.1 Hrubý spád .....	17
2.3.2 Čistý spád .....	18
3 Volba vhodné turbíny pro lokalitu .....	21
3.1 Kaplanova turbína .....	22
3.2 Vírová turbína .....	23
3.3 Bánkiho turbína .....	25
3.4 Důvody volby Vírové turbíny .....	26
3.5 Výpočet základních parametrů Vírové turbíny .....	26
3.6 Výpočet parametrů turbíny pro vyšší průtok.....	29
3.7 Návrh možných řešení.....	30
4 Návrh jednotlivých částí MVE.....	31
4.1 Nádrž a rám nádrže .....	32
4.2 Volba snímače hladiny .....	35
4.3 Přívod k nádrži a přepad.....	37
4.4 Přívod k vodnímu kolu a vodní kolo .....	39
4.5 Potrubí a rám potrubí.....	42
4.6 Česle, lávky a žebřík .....	45
4.7 Generátor .....	47
4.8 Montážní postup.....	47
5 Modelování proudění v přivaděči .....	50
5.1 Tvorba výpočetních objemů a sítě .....	50
5.1.1 Definování okrajových podmínek.....	53
5.2 Výpočet plně vyvinutého laminárního profilu v přívodu.....	54
5.3 Řešení proudění v kašně a přívodu na turbínu ve Fluentu .....	56
5.4 Vyhodnocení proudění .....	58
5.4.1 Oblast nátoky do kašny a ohybu proudu .....	61
5.4.2 Oblast přívodu na turbínu.....	64
5.4.3 Oblast výstupu ze savky .....	65
5.4.4 Rozložení hydrostatického tlaku .....	66
6 Potřebné stavební úpravy .....	67
7 Částečné ekonomické hodnocení .....	68
7.1 Množství vyrobené el. energie a její výkupní ceny.....	68
7.2 Předpokládané náklady na realizaci MVE .....	70
8 Závěr.....	72
9 Seznam použitých zdrojů .....	74
10 Seznam použitých zkratk a symbolů .....	76
11 Seznam příloh.....	79

## 1 ÚVOD

Diplomová práce se zabývá návrhem projektu malé vodní elektrárny pro konkrétní lokalitu. Budou zde určeny správné parametry dané oblasti podle, kterých je zvolena vhodná turbína a vypočten její průměr a výkon. V závislosti na požadavcích zadání a vlastnostech lokality bude vytvořena základní projektová dokumentace elektrárny, tak aby bylo možné zařízení uvést do provozu. V poslední části bude provedeno modelování proudění v přivaděči na turbínu a také zhodnocen vliv tohoto přivaděče na vlastní proudění. Tato práce by měla sloužit jako ideový návrh, při projektování malé vodní elektrárny v zadané lokalitě.

### 1.1 PROBLEMATIKA VODNÍCH ELEKTRÁREN

Energii z vody lze získávat využíváním její rychlosti tj. energie pohybová, kinetická a jejího tlaku tj. energie potenciální, tlaková nebo také obou těchto energií současně. Podle způsobu využívání potom rozlišujeme typy vodních strojů na rovnotlaké např. vodní kolo, Bánkiho nebo Peltonova turbína a přetlakové jako je Kaplanova a Francisova turbína. Pro hodnocení dané lokality a volby vhodného vodního stroje jsou důležité dva základní parametry a to využitelný spád a průtočné množství vody v daném profilu, které můžeme využít. V České republice nejsou podmínky pro budování velkých vodních energetických děl ideální, ale přesto hrají vodní elektrárny v rámci obnovitelných zdrojů důležitou roli. Nejstarším zařízením tohoto typu v Čechách byla vodní elektrárna v Písku, vybudovaná v roce 1888. Byla zřízena v návaznosti na velký úspěch propagačního osvětlení centra města Františkem Křížkem 23. června 1887. Také v Praze existovaly již na začátku 20. století dokonce dvě vodní elektrárny – na Těšnově a na Štvanici. Těšnovská byla roku 1929 zrušena, štvanická je po rekonstrukci dodnes v provozuschopném stavu, jak uvádí [1]. Největší vodní díla byla u nás vybudována po roce 1950, kdy došlo téměř v celé Evropě k rozvoji hydroenergetických děl v rámci poválečné obnovy a rozvoje hospodářství. Později se pozornost soustředila na přečerpávací elektrárny, protože pro klasické špičkové elektrárny o dostatečném výkonu u nás nebyly vhodné lokality. Všechny velké vodní elektrárny, s výjimkou Dalešic, Mohelna a Dlouhých Strání, jsou situovány na toku Vltavy, kde tvoří kaskádový systém – Vltavskou kaskádu. Byly vybudovány ve 40 - 70 letech 20. století a největší elektrárna Orlík má instalovaný výkon 360 MW.



Obr.1 Výroba elektřiny ve vodních elektrárnách podle výkonu, převzato z [2]

Současný podíl obnovitelných zdrojů na hrubé spotřebě elektrické energie se pohybuje kolem 5 %, k čemuž hlavně přispívá využití vodní energie. Podíl výroby elektrické energie ve vodních elektrárnách na celkové výrobě v ČR poměrně nízký a tvoří asi 17 % z celkového instalovaného výkonu ČR, podrobný podíl jednotlivých malých vodních elektráren (dále jen MVE) podle velikosti výkonu ukazuje obr.1. Těchto hodnot se dosáhlo především výstavbou přečerpávacích vodních elektráren,



kteří mají v souhrnu instalovaný výkon přibližně 1150 MW. Ostatní elektrárny schopné pracovat ve špičkách spotřeby však mají instalovaný výkon pouze 750 MW. Elektrárny tohoto typu velmi účinně zasahují při rychlém nárůstu, popř. poklesu, nároků odběratelů v průběhu dne, popř. týdne a zlepšují podmínky výroby zejména výkonných tepelných a jaderných elektráren. Elektrický proud vyrobený ve vodních elektrárnách patří mezi nejlevnější, náklady představují asi 65 % nákladů tepelné elektrárny, každá kilowatthodina vyrobená v MVE ušetří přibližně 1,4 až 1,5 kg hnědého energetického uhlí v tepelné elektrárně. Vodní elektrárny v tom smyslu dnes ročně nahrazují asi 3 mil. tun hnědého energetického uhlí, přičemž toto množství by mohlo být při plném využití hydroenergetického potenciálu více než trojnásobné.

Hydroenergetický technicky využitelný potenciál naší republiky se zahrnutím všech aspektů zohledňujících životní prostředí, osídlení, infrastrukturu a rozmístění průmyslu se odhaduje v průměrně vodném roce na maximálně 3 400 GWh/rok, z toho na malé vodní elektrárny (což jsou v ČR elektrárny s instalovaným výkonem pod 10 MW, v EU pod 5 MW) připadá 1 570 GWh/rok. V současné době je v provozu okolo 1 400 malých vodních elektráren (přibližně 2/3 z nich mají výkon do 100 kW) s celkovým instalovaným výkonem 275 MW a roční výrobou elektrické energie 700 GWh, což odpovídá 45 % využitelného potenciálu, jak je uvedeno v [2]. Významným úkolem vodních elektráren je však sloužit jako doplňkový zdroj výroby elektrické energie a využívat především své schopnosti rychlého najezení na velký výkon a tedy operativního vyrovnání okamžité energetické bilance v elektrizační soustavě ČR. Špičkové elektrárny přispívají ke zkvalitnění dynamických vlastností i k udržení požadovaných kvalit sítě (i v rámci EU).

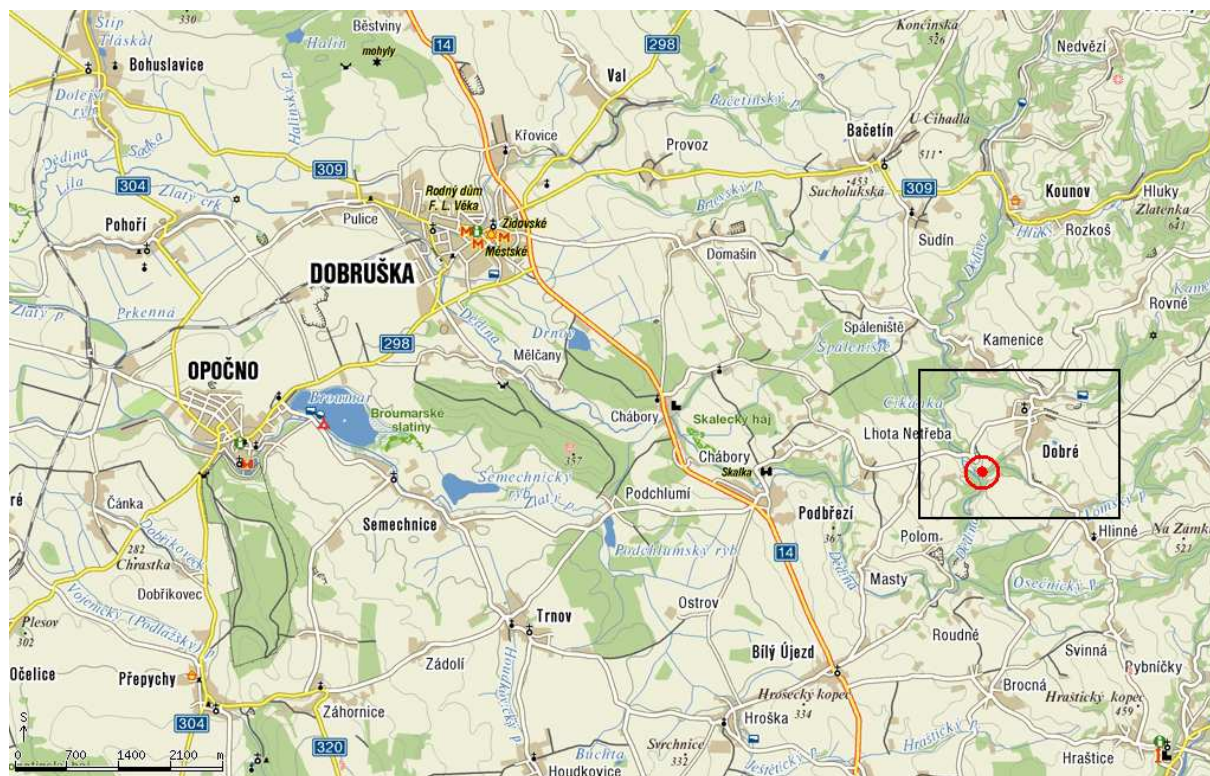
#### Výhody využití vodních elektráren:

- vodní energie je obnovitelným nevyčerpatelným zdrojem energie
- při vlastní spotřebě elektrické energie se vyhneme přenosovým ztrátám
- při výrobě nejsou produkovány žádné škodlivé emise (SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, NO, popel)
- přebytky vyrobené elektrické energie může výrobce prodávat do veřejné rozvodné sítě na základě smluvního vztahu s distribuční společností (majitelem rozvodné sítě elektřiny) a tím může výrazně ovlivnit návratnost vložených finančních prostředků

#### Nevýhody využití vodních elektráren:

- poměrně časově a finančně náročná předrealizační fáze
- při stavbě nového vodního díla je nutné vynaložit poměrně vysoké investiční náklady
- návratnost vložených financ. prostředků je závislá na využití vyrobené elektrické energie

Elektrárna bude umístěna v malebném údolí Zlatého potoka poblíž obce Dobré v Králověhradeckém kraji, její přesnější polohu vzhledem k obci Dobré ukazuje obr.2. Zařízení MVE má být v budově starého mlýna, který za dob Marie Terezie sloužil jako krupařský mlýn a později tkalcovna. Tento objekt je postupně rekonstruován a bude sloužit jako ekologické centrum křesťanské organizace A Rocha.



Obr.2 Poloha mlýna vzhledem k obci Dobré

Budoucí MVE bude realizována na řece Dědině a jak již bylo řečeno má být umístěna v budově starého mlýna, ke kterému vede již dříve vybudovaný přivaděč. Ten odebírá pomocí stavidla vodu z Dědiny a asi po 250 metrech ji odpadní část kanálu opět přivádí zpět do řeky. Po pár metrech za stavidlem je umístěný jalový přepad, který slouží pro regulaci výšky hladiny v přivaděči. Téměř celý přivaděč má kamenné dno a je poměrně znečištěný řasami a rostlinami, jen jeho malá část, přibližně 4 m, která leží těsně před vstupem do budovy je betonová. V tomto místě má šířku 1,4 m a výšku 0,39 m, jinak je průřez nepravidelný a zasahují do něj rostliny a kmeny stromů, což je dobře vidět na obr.3. Po vstupu do místnosti je voda vedena pomocí dřevěného deskového přepadu, který má zajistit plynulý průchod vody mlýnem. Po průchodu místností voda odchází skrz výtokovou mříž do odpadní části kanálu. Mříž na výstupu z místnosti brání částečně odtoku vody z místnosti a tak zde uměle navyšuje výšku hladiny, která je důležitá při výpočtu čistého spádu.



Obr.3 Současný stav přivaděče

## 2.2 URČENÍ OPTIMÁLNÍHO PRŮTOKU

Průtok představuje průtočné množství vody v daném využitelném profilu, spolu se spádem je hlavním parametrem při navrhování vodní elektrárny, na jejich velikosti je přímo závislá hodnota výkonu a tudíž i množství elektřiny dodávané turbínou do sítě. V ideálním případě by bylo nejvhodnější, kdyby byl průtok po celou dobu roku konstantní. Za tohoto stavu by turbína pracovala při optimálním průtoku, na který je navržena a tedy i s maximální účinností. Ve skutečnosti tomu tak není a průtok v průběhu roku značně kolísá, proto se snažíme zvolit optimální průtok pro turbínu tak, abychom dosáhly maximálního výkonu turbíny v daném roce. To zaručíme volbou takového průtoku, který nám zajistí zpracování co největšího množství vody. Většinou se turbína navrhuje na 90 až 120 dnů vodu, kterou jsme schopni v řece zaručit. V dny, kdy průtok nedosahuje optimálních hodnot, se snažíme turbínu vhodně regulovat, tak aby pracovala s co nejlépe dosažitelnou účinností, pro daný průtok.

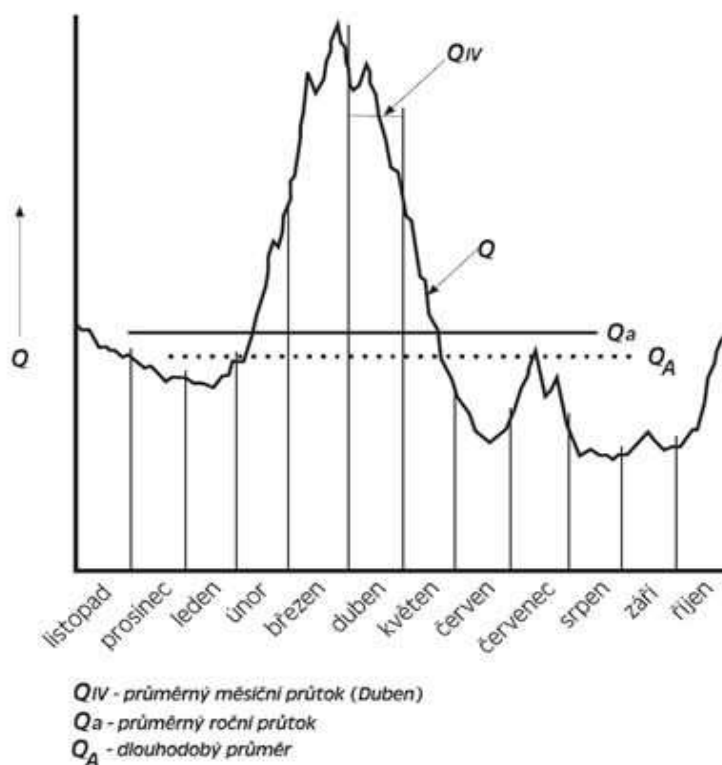
Hodnoty průtoků pro většinu řek v České republice lze zjistit za určitou finanční částku u Českého hydrometeorologického ústavu (dále jen ČHMU) jako tzv. dlouhodobý průměrný průtok  $Q_a$ , N-leté průtoky a M-denní průtoky. Pro využití energie vody jsou nejdůležitější M-denní průtoky (křivka překročení průtoků v průměrně vodném roce neboli M-denní odtoková závislost), jak je uvedeno v [3]. Ty udávají průtok zaručený v daném profilu toku po určitý počet dní. Data se uvádějí číselně v obvyklém členění po 30 dnech v roce, příklad tohoto zápisu je v tab.1 a na obr.4. ČHMU poskytuje data o průtocích i několik let zpětně a je tedy schopen dát nám představu o kolísání průtoku v průběhu několika let nebo i desetiletí. Výhodou je mít co nejvíce dat, aby byl zvolený optimální průtok co nejrealnější. K získání dat je potřeba sepsat s ČHMU smlouvu a samozřejmě uhradit požadovanou finanční částku.



Dalšími variantami zjištění průtoku je možnost přímého proměření rychlostního profilu v kanále pomocí hydrometrických vrtulí, sondami nebo ultrazvukem. Tyto operace jsou však značně finančně náročné a snažíme se jim vyhnout. Proto tento způsob určení průtoku nebude realizován.

M [dní]	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
Q [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]	2,7	1,9	1,5	1,2	1,0	0,85	0,75	0,6	0,5	0,4	0,34	0,25	0,18

Tab.1 Příklad M-denní průtokové závislosti, převzato z [3]



Obr.4 Průběh průtoku v roce, průměrný roční a měsíční průtok, převzato z [3]

Třetí možností určení optimálního průtoku je využití teorie měření průtoku obdélníkovým přepadem s volnou hladinou, kdy z naměřené výšky mezi hladinou a hranou přepadu usuzujeme na průtok. Schéma měření je znázorněno na obr.5.

V tomto případě, kdy nelze použít přímého měření pomocí hydrometrických vrtulí a ani získaná data z ČHMU, protože hydrometeorologický ústav si podmiňuje zasláním dat určitými právními kroky, kterými vznikají závazky objednavatele vůči ústavu, což je celé poměrně komplikované a z tohoto důvodů pro nás nerealizovatelné. Byl vybrán jako nejvhodnější postup určení optimálního průtoku výpočet průtoku pomocí metody obdélníkového přepadu s následnou kombinací dat získaných bezplatně z webových stránek ČHMU.

## 2.2.1 VÝPOČET PRŮTOKU V PŘÍVODU METODOU OBDÉLNÍKOVÉHO PŘEPADU

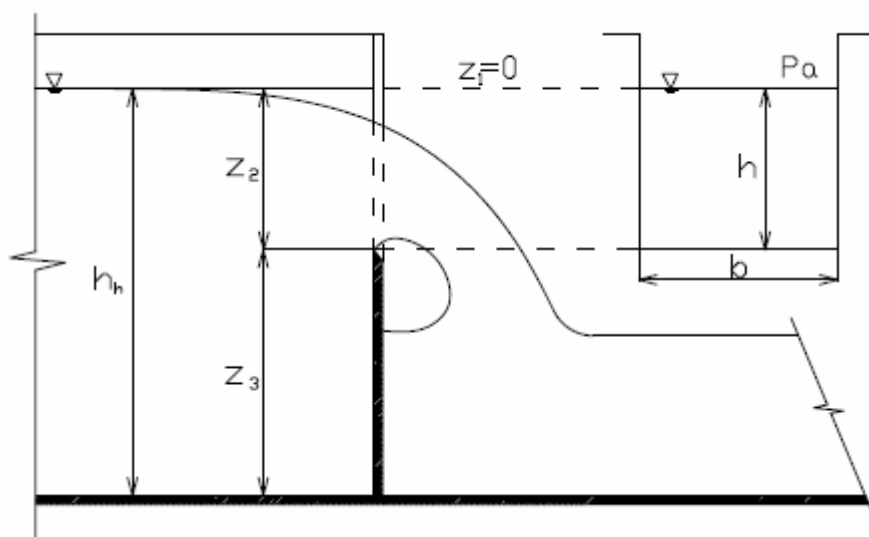
K měření byl využit stávající dřevěný deskový přepad o šířce 1,4 m. Měření probíhalo při maximálně otevřeném stavidle a zcela zavřeném jalovém přepadu. Po ustálení hladiny byla v dostatečné vzdálenosti před svažující se hladinou do přepadu naměřena výška přepadání  $h = 0,12$  m. Potom metodou obdélníkového přepadu z naměřené výšky přepadání určíme průtok  $Q$ :

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h^{\frac{3}{2}} \quad (2.1)$$

, kde:  $\mu = 0,65$   
 $b = 1,4$  m  
 $g = 9,81$  m·s<sup>-2</sup>  
 $h = 0,12$  m

$$Q = \frac{2}{3} \cdot 0,65 \cdot 1,4 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81} \cdot 0,12^{\frac{3}{2}}$$

$$Q = 0,112 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$



Obr.5 Obdélníkový přepad s volnou hladinou, převzato z [18]

## 2.2.2 URČENÍ PRŮTOKU V ŘECE DĚDINA POMOCÍ DAT Z ČHMU

Z důvodů uvedených v kapitole 2.2 jsou v našem případě data o průtocích získávána z webových stránek ČHMU, kde je vždy zveřejňováno šest dní měření. Jako vhodná měřicí stanice byla vybrána stanice Chábory, která leží asi 8 km po proudu od místa umístění MVE, v této vzdálenosti nemá řeka žádné velké přítoky a naměřené hodnoty by měli být vypovídající o skutečném průtoku v místě budované MVE. Měřicí zařízení se nachází pod novým silničním mostem Dobruška - Rychnov, při pravém břehu řeky viz. obr.6.

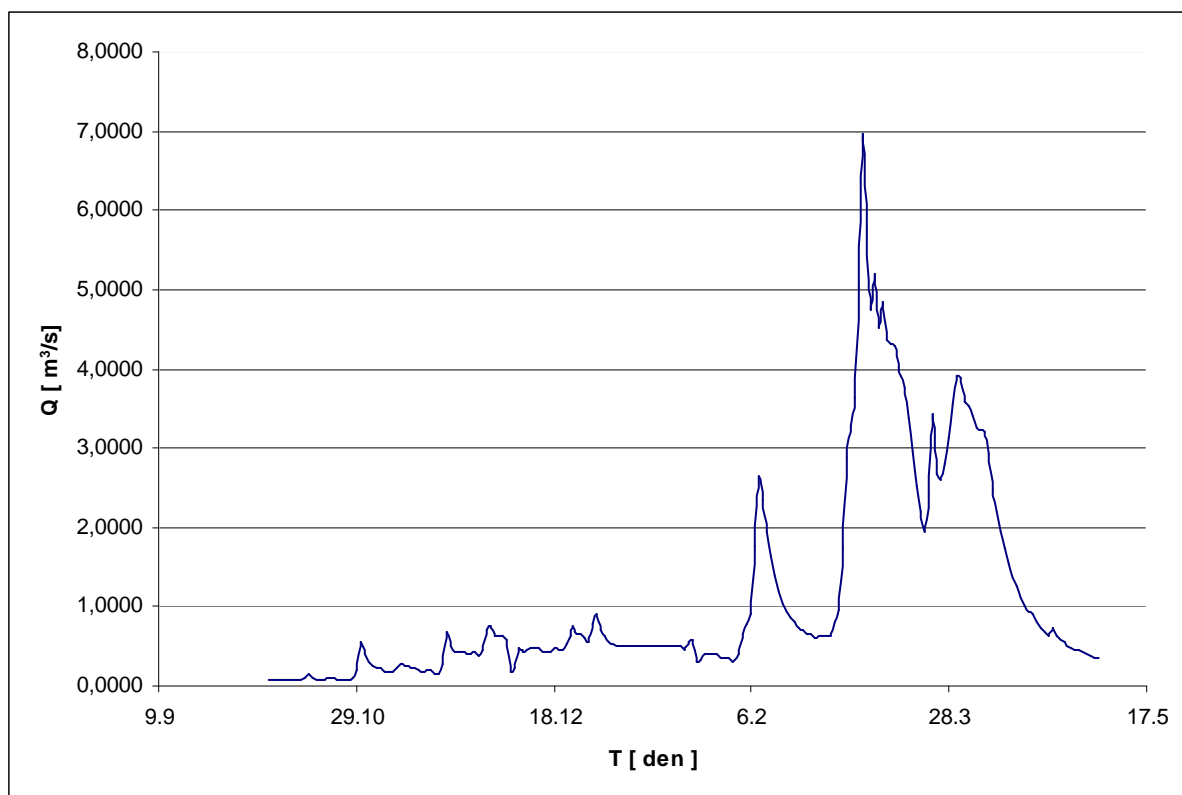


Obr.6 Poloha měřicí stanice Chábory vzhledem k umístění MVE

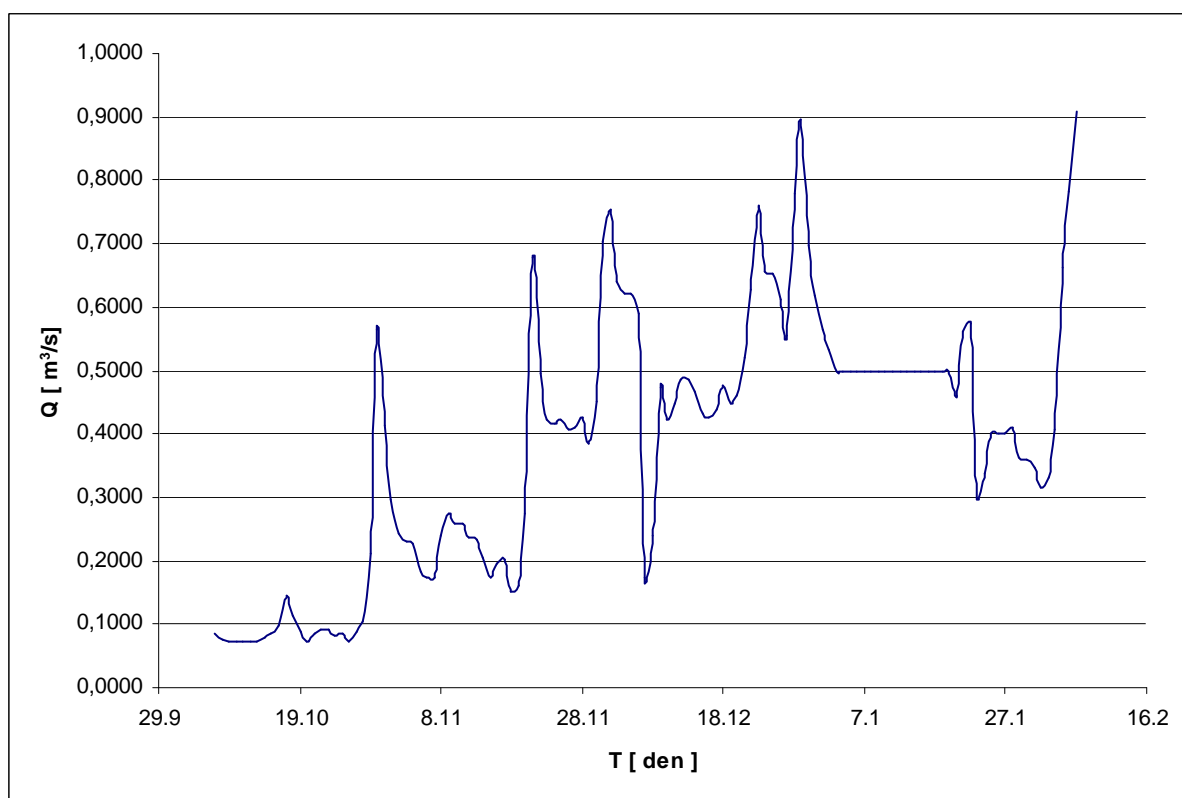
V hodinových intervalech je zobrazován měřený průtok a výška hladiny. Data jsou získávána od 7. října 2008 do 5. května 2009 a jsou podrobněobrazena v příloze 1. Závislost velikosti průtoku v řece na čase zobrazuje graf 1, pro podrobnější představu v grafu 2 je zobrazena opět závislost průtoku na čase, ale v období, kdy bylo v řece méně vody tj. od 7.10. 2008 do 6.2. 2009. Tento celkový objem dat není určitě zcela postačující pro zvolení vhodného optimálního průtoku, ale má nám poskytnout přibližnou představu o průběhu jeho hodnot a podpořit námi teoreticky zvolenou hodnotu optimálního průtoku. Data jsou získávána v průběhu pouhých 7. měsíců, což je poměrně krátká doba, ale z hlediska zadání a termínu odevzdání této práce je to doba dostačující. Ze zjištěných dat vyplývá, že průtok v řece Dědině v období od 7.10 do 5.5 neklesal pod  $0,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , jak ukazuje příloha 1 a graf 1 a 2. Dále bylo zjištěno, že pro danou lokalitu je průměrný roční průtok  $Q_a = 0,920 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a N – leté průtoky jsou:

- $Q_1 = 7,850 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- $Q_5 = 21,100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- $Q_{10} = 29,500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- $Q_{50} = 56,300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- $Q_{100} = 71,400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Maximální výška hladiny byla naměřena den 23. 7. 1998 a to 4,42 m.



Graf 1 Závislost středního denního průtoku v řece Dřevina na čase v období od 7.10. do 5.5.



Graf 2 Závislost středního denního průtoku v řece Dřevina na čase v období od 7.10. do 6.2.

## 2.2.3 OPTIMÁLNÍ PRŮTOK

Z výsledků předcházejících dvou přístupů, kdy podle prvního pro naměřenou přepadovou výšku  $h = 0,12$  m byl podle metody obdélníkového přepadu vypočten průtok  $Q = 0,112 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Dále podle druhého přístupu, kdy ze zjištěných hodnot průtoků z webových stránek ČHMU vyplývá, že průtok po 89,5 % doby měření neklesl pod  $0,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , byl také v závislosti na dřívější zkušenostech na jiných lokalitách a z důvodu ponechání určitého sanačního průtoku v řece, zvolen optimální průtok  $Q_{op} = 0,12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Na tento průtok bude navrhována turbína a bude brán v úvahu při výpočtu proudění v přivaděči a také při návrhu dalších dílů MVE.

Pro další návrh součástí MVE je důležité také znát výšku hladiny v přívodu pro optimální průtok  $Q_{op}$ . Tato výška hladiny je vypočítaná pomocí metody výpočtu rovnoměrného průtoku v kanálech a to podle Ganquillet – Kuttera, který svůj výpočet odůvodnil na základě měření v řekách a potocích, jak uvádí [4]. Správná výška hladiny je určena z rovnic (2.2) pro průtok podle Ganquillet – Kuttera, kdy je vyjádřena hledaná výška hladiny  $h_s$  a pomoci 20. iterací zjištěna její správná hodnota pro  $Q_{op} = 0,12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , tedy:

$$v_{G-K} = C_{G-K} \cdot \sqrt{R \cdot i_0} \quad (2.2)$$

$$C_{G-K} = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0,00155}{i_0}}{1 + \left( 23 + \frac{0,00155}{i_0} \right) \cdot \frac{n}{\sqrt{R}}} \quad (2.3)$$

- hledaná výška hladiny  $h_s$  (postup prvního iteračního kroku):

$$\sum_{i=1}^{20} h_{Si} = \frac{Q_{op}}{C_{G-Ki} \cdot \sqrt{\frac{b \cdot h_0}{2 \cdot h_0 + b} \cdot i_0 \cdot b}} = \frac{0,12}{30,05 \cdot \sqrt{\frac{1,4 \cdot 0,126}{2 \cdot 0,126 + 1,4} \cdot 0,002 \cdot 1,4}} \quad (2.4)$$

$$h_{S1} = 0,195 \text{ m}$$

$$\sum_{i=0}^{19} C_{G-Ki} = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0,00155}{i_0}}{1 + \left( 23 + \frac{0,00155}{i_0} \right) \cdot \frac{n}{\sqrt{\frac{b \cdot h_0}{2 \cdot h_0 + b}}}} = \frac{23 + \frac{1}{0,02} + \frac{0,00155}{0,002}}{1 + \left( 23 + \frac{0,00155}{0,002} \right) \cdot \frac{0,02}{\sqrt{\frac{1,4 \cdot 0,126}{2 \cdot 0,126 + 1,4}}}} \quad (2.5)$$

$$C_{G-K0} = 30,05$$

, kde:  $Q_{op} = 0,120 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

$b = 1,4 \text{ m}$

$n = 0,02$  pro starý beton, podle [4]

$i_0 = 0,2\% = 0,002$

$h_0 = 0,126 \text{ m}$



Po zkonvergování výpočtu je správná výška hladiny v přívodu  $h_s = 0,164$  m, výsledky jednotlivých iteračních kroků obsahuje příloha 2. Pro ověření správnosti tohoto výpočtu byly provedeny výpočty podle Chézyho, Manninga a Pavlovského, jejich shrnutí je uvedeno v příloze 2, kde je vidět, že výsledky jednotlivých postupů se přibližně shodují.

- střední rychlost v průřezu při  $Q_{op}$ :

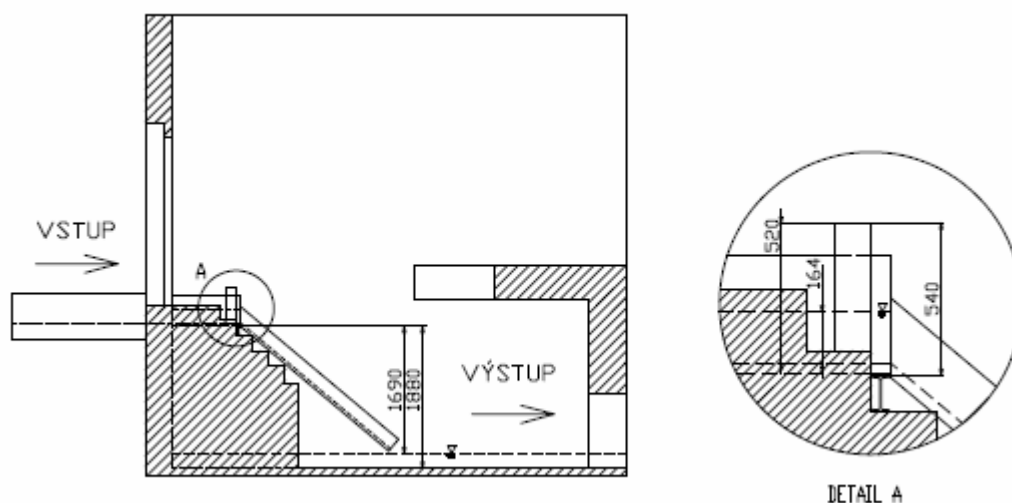
$$v_1 = \frac{Q_{OP}}{S_{OP}} = \frac{Q_{OP}}{b \cdot h_s} = \frac{0,12}{1,4 \cdot 0,164} \quad (2.6)$$

$$v_1 = 0,523 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

## 2.3 URČENÍ HRUBÉHO A ČISTÉHO SPÁDU

### 2.3.1 HRUBÝ SPÁD

Spád představuje výškový rozdíl vodních hladin a v praxi lze rozdělit spád na dva typy a to hrubý (brutto) spád a čistý (netto) spád. Hrubý spád představuje rozdíl hladin mezi profilem vzduté hladiny a profilem pod vzdouvacím objektem, jak uvádí v [5]. V našem případě je tato hodnota měřená v místě vtoku vody do budovy, kde se nachází MVE a výtokem z této budovy jak ukazuje obr.7. Jednotlivé vzdálenosti byly měřeny při maximálně otevřeném stavidle a zavřeném jalovém přepadu, pomocí pásmového měřidla. A to tak, že nejdříve byly vhodně zvoleny body na stávajícím zařízení jako např. bod na horní ploše profilu I nebo bod na čelní ploše profilu U a poté byla jejich vhodnou kombinací vypočtena výška rozdílu hladin na vstupu a na výstupu z místnosti.



Obr.7 Schéma měření hrubého spádu

- výpočet hrubého spádu  $H_B$ :

$$H_B = 1690 + 540 - 520 + 164 = 1874 \text{ mm} \quad (2.7)$$

, kde hodnoty představují následující vzdálenosti:

- vzdálenost od hladiny k horní ploše profilu I = 1690 mm
- vzdálenost od horní plochy profilu I k čelní ploše profilu U = 540 mm
- vzdálenost od čelní plochy profilu U ke dnu přívodu = 520 mm
- výška hladiny při optimálním průtoku  $0,120 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $h_s = 164 \text{ mm}$

$$\underline{H_B = 1,874 \text{ m}}$$

## 2.3.2 ČISTÝ SPÁD

Čistý spád  $H$  nepředstavuje pouze rozdíl hladin a odečtení příslušných ztrát, ale vyjadřuje rozdíl celkové energie, kterou má voda přitékající do oblasti turbíny a celkové energie, která odtéká za turbínou, jak je uvedeno v [5]. Výpočtem čistého spádu je získán spád, který je pro turbínu k dispozici a na který se bude daná turbína navrhovat, potom:

$$H = H_B - (H_{\text{čb}} + H_{Z1,2}) + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} - \alpha_4 \frac{v_4^2}{2g} \quad (2.8)$$

, kde:  $H_B$  – hrubý spád, který byl určen v rovnici (2.7)

$H_{\text{čb}}$  – ztráta v česlích vypočítána podle rovnice (2.9)

$H_{Z1,2}$  – součet ztrátový výšek pomocí hodnot určených z výpočtu proudění v programu Fluent viz. rovnice (2.14).

$\frac{v_1^2}{2g}$  – kinetická energie na vstupu, kterou má každý kilogram vody přitékající do nádrže

$\frac{v_4^2}{2g}$  – kin. energie na výstupu, s kterou odtéká voda sací troubou, jak je uvedeno v [5].

$\alpha_1, \alpha_4$  – Coriolisova čísla pro vstup a výstup ze systému (určeno z výpočtu proudění)

a) výpočet ztrát  $\xi_{\text{čb}}$  vzniklých průtokem středními česlemi (podle upraveného Berezinského vztahu s uvažováním konstrukčních prvků):

$$\xi_{\text{čb}} = \beta_B \cdot \left( \frac{s}{s + b_{\text{č}}} + p_K \right)^{1,6} \cdot \left( 2,3 \cdot \frac{L}{b_{\text{č}}} + 8 + 2,4 \cdot \frac{b_{\text{č}}}{L} \right) \cdot \sin \alpha_{\text{č}} \quad (2.9)$$

$$\xi_{\text{čb}} = 0,32 \cdot \left( \frac{0,005}{0,005 + 0,03} + 0,1 \right)^{1,6} \cdot \left( 2,3 \cdot \frac{0,025}{0,03} + 8 + 2,4 \cdot \frac{0,03}{0,025} \right) \cdot \sin 60^\circ$$

, kde:  $\beta_B = 0,32$  určeno z přílohy 3 pro obdélníkový tvar česlí se zaoblenými hranami

$p_K = 0,1$  určeno v závislosti na velikosti konstrukčních prvků, které jsou díky tomu, že máme ručně stírané česle malé

$s = 0,005$  m

$b_{\text{č}} = 0,030$  m

$L_{\text{č}} = 0,025$  m

$\alpha_{\text{č}} = 60^\circ$

$$\xi_{\text{čb}} = 0,368$$

$$Y_{Z\text{č}} = \xi_{\text{čb}} \cdot \frac{v_1^2}{2} = 0,368 \cdot \frac{0,523^2}{2} \quad (2.10)$$

, kde:  $v_1 = 0,523$  m·s<sup>-1</sup>

$$Y_{Z\text{č}} = 0,05 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

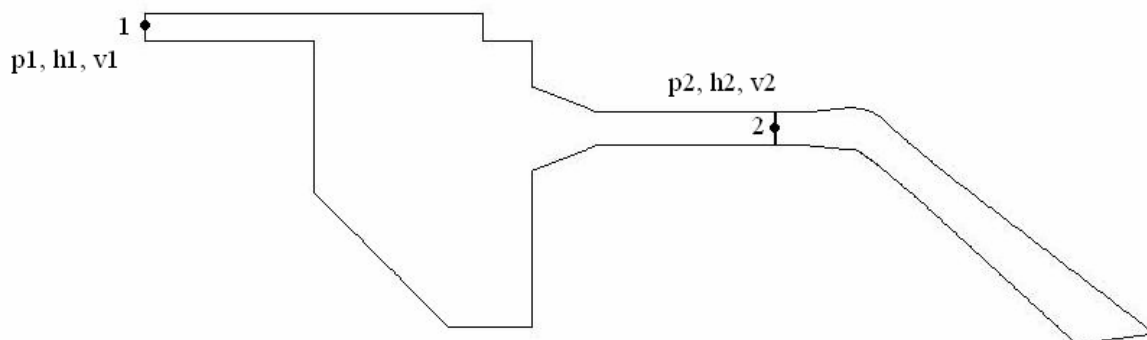
$$H_{cb} = \frac{Y_{ZC}}{g} = \frac{0,05}{9,81} \quad (2.11)$$

, kde:  $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

$$\underline{H_{cb} = 0,00513 \text{ m}}$$

b) Ztrátová výška  $H_{Z 1,2}$  je určena ze ztrátové měrné energie  $Y_{Z 1,2}$  mezi body 1 a 2, jejichž poloha je vidět na obr.8 a to pomocí Bernoulliovy rovnice (2.12) pro skutečnou kapalinu. Takto určená ztrátová výška představuje ztrátu vzniklou ohybem proudu v nádrži, ztrátu zúžením průřezu ve vstupním kuželu do potrubí a ztráta v potrubí. Hodnoty tlaků a rychlostí v příslušných bodech byly určeny z výpočtu proudění, které následuje v kapitole 5.

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + g \cdot h_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + g \cdot h_2 + Y_{Z1,2} \quad (2.12)$$



Obr.8 Schéma polohy bodů v systému MVE

z rovnice (2.12) je pak vyjádřena ztrátová měrná energie  $Y_{Z 1,2}$ :

$$Y_{Z1,2} = \frac{p_1 - p_2}{\rho} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + g \cdot (h_1 - h_2) \quad (2.13)$$

$$Y_{Z1,2} = \frac{774,2 - (-2114,7)}{998,2} + \frac{0,523^2 - 3,8^2}{2} + 9,81 \cdot (1,982 - 1,373)$$

, kde:  $v_1 = 0,523 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$   
 $v_2 = 3,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$   
 $p_1 = 774,2 \text{ Pa}$   
 $p_2 = -2114,7 \text{ Pa}$   
 $h_1 = 1,982 \text{ m}$   
 $h_2 = 1,373 \text{ m}$   
 $\rho = 998,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

$$Y_{Z 1,2} = 1,784 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$$

$$H_{z1,2} = \frac{Y_{z1,2}}{g} = \frac{1,784}{9,81} \quad (2.14)$$

$$\underline{H_{z1,2} = 0,182 \text{ m}}$$

c) čistý spád  $H$  je pak po dosazení do rovnice (2.8):

$$H = H_B - (H_{cb} + H_{z1,2}) + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} - \alpha_4 \frac{v_4^2}{2g}$$

$$H = 1,874 - (0,00513 + 0,182) + 1,0225 \frac{0,523^2}{2 \cdot 9,81} - 1,909 \frac{0,574^2}{2 \cdot 9,81}$$

, kde:  $H_B = 1,874 \text{ m}$

$$H_{cb} = 0,00513 \text{ m}$$

$$H_{z1,2} = 0,182 \text{ m}$$

$$v_4 = 0,574 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\alpha_1 = 1,0225$$

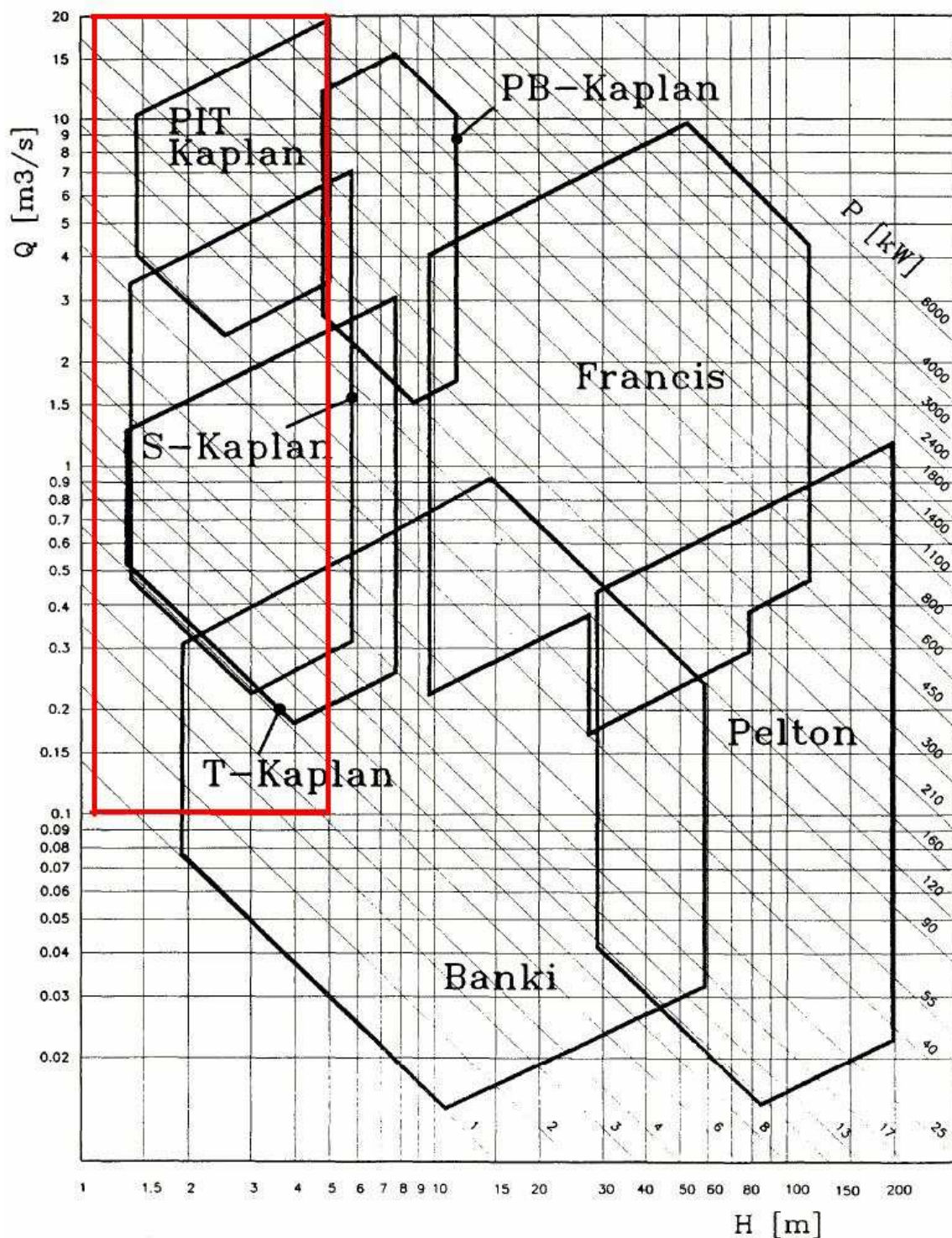
$$\alpha_4 = 1,909$$

$$\underline{H = 1,67 \text{ m}}$$

Z výše uvedených výpočtů byl zjištěn optimální průtok  $Q_{op} = 0,12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a čistý spád  $H = 1,67 \text{ m}$ , podle těchto hodnot bude nyní zvolena vhodná turbína.

### 3. VOLBA VHODNÉ TURBÍNY PRO LOKALITU

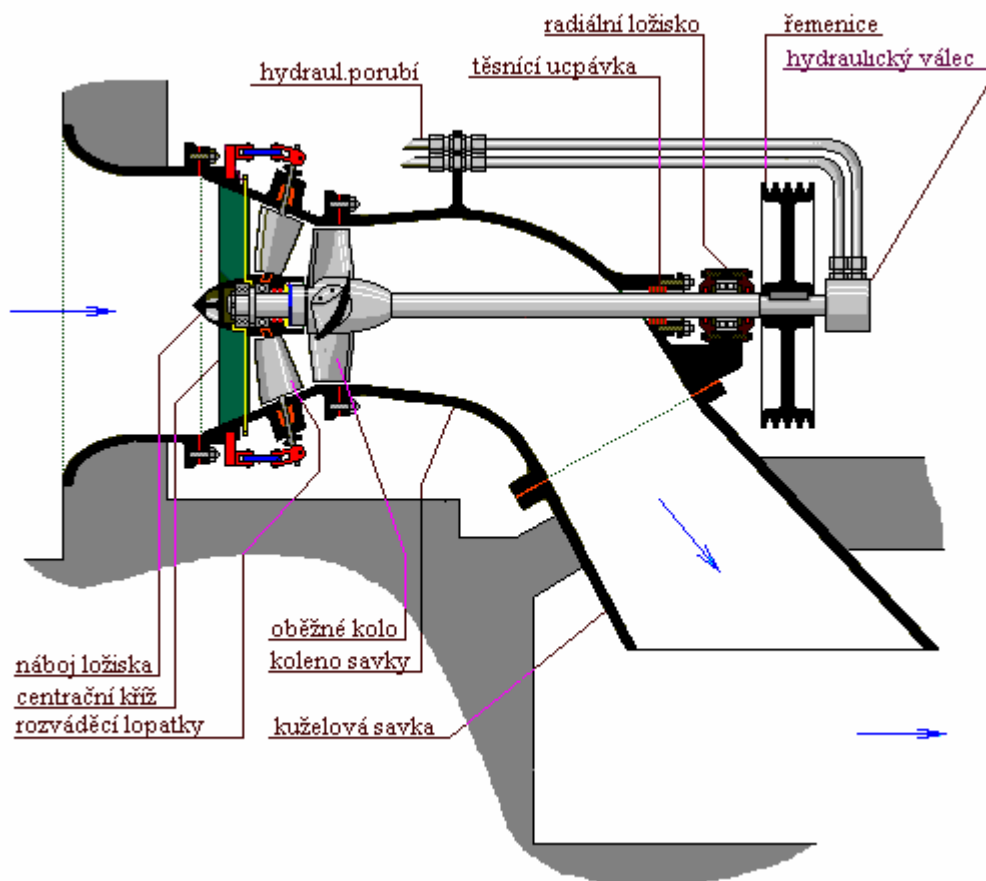
Tato lokalita se vyznačuje malým spádem a současně i malým průtokem z toho plyne jen velmi úzká oblast výběru vhodné použitelné turbíny. Z níže uvedeného obr.9, na kterém je graf závislosti  $Q$  na  $H$  je patrné, že pro  $Q = 0,12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a  $H = 1,67 \text{ m}$  lze použít pouze Vírovou turbínu (oblast použití této turbíny je vyznačena červeným obdélníkem). Turbíny, které by v krajním případě připadaly v úvahu je Kaplanova a Bánkiho turbína. Pro srovnání budou níže uvedeny vlastnosti a principy všech tří turbín.



Obr.9 Q-H diagram zobrazující oblasti použitelnosti různých turbín, převzato z [6]

### 3.1 KAPLANOVA TURBÍNA

Kaplanova turbína na obr.10 je přetlaková axiální turbína s dobrou možností regulace, která se dá využít na tocích, kde není možno zajistit pro potřebnou část roku stálý průtok a spád. Je určena pro lokality s malými spády a velkými průtoky a to v rozsahu měrných energií  $E = (10 \text{ až } 700) \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ , jak uvádí [18]. V optimu dosahuje turbína účinnosti kolem 88 %, velké jednotky jsou schopny dosáhnout i více než 90 %. Jednotlivé typy se rozlišují počtem lopatek oběžného kola v rozsahu 3 až 10. Hlavní výhodou Kaplanových turbín je efektivní využívání průtoku v širokém regulačním rozsahu, díky možnosti natáčení lopatek jak rozvaděče, tak i oběžného kola. Nevýhodou užívání Kaplanových turbín pro nízké spády je nutnost použití finančně nákladného rozvaděče, tyto zvýšené finanční náklady jsou způsobené jednak konstrukcí samotného rozvaděče, jeho mechanickou složitostí a také vysokými náklady na jeho údržbu. Dalšími nevýhodami je nebezpečí vzniku kavitace a možnost zvyšování hydraulických ztrát vlivem odtržení mezní vrstvy v savce.



Obr.10 Kaplanova turbína, převzato z [7]

Pro lokality s malým spádem bývá často používána přímoproudá horizontální Kaplanova S-turbína, které se také říká Semi-Kaplan, její název je odvozen od esovitěho tvaru její sací trouby. Turbína Semi-Kaplan je vhodná pro oblasti s hydrologickým charakterem, který se vyznačuje nízkými spády a také pro rekonstruovaná vodní díla dříve osazená vertikální Francisovou turbínou, kde je schopna díky své regulaci dosáhnout i lepšího využití toku. Turbína je schopná využívat spádů 1,5 - 5,5 m, při průtocích  $0,25 - 6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , jejími ideálními parametry jsou však spády 2 - 4 m a průtoky  $0,5 - 3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , jak uvádí [7]. Pokud je

použita přímoproudá varianta turbíny jsou nižší finanční náklady na stavební část, protože v důsledku možnosti regulace nebude zapotřebí kašny ani hlubokého vývařiště. Další výhodou je horizontální uložení hřídele, které umožní, že pokud bude přenos kroutícího momentu z hřídele turbíny na generátor řešen pomocí vícenásobného klínového řemene (což platí pro menší turbíny) bude možno generátor umístit dostatečně vysoko, aby byl chráněn proti zatopení, jak uvádí [7]. Použitím této modifikace Kaplanovy turbíny lze částečně odstranit nedostatek finančně nákladného rozvaděče, protože má pevný rozvaděč a turbínu lze tedy regulovat pouze natáčecími lopatkami oběžného kola, zde je ale nevýhodou udržování dvou hřídelových ucpávek a nepřístupné ložisko, které je pod vodou.

### 3.2 VÍROVÁ TURBÍNA

Byla vyvinuta v roce 2000 na zdejším odboru fluidního inženýrství Victora Kaplana FSI VUT v Brně pod vedením Profesora Ing. Františka Pochylého, Csc. Tento typ turbíny je schopný zpracovat velmi nízké spády (1-3 m) a poměrně velké průtoky (to závisí na velikosti oběžného kola turbíny), při zajištění vysoké účinnosti a větší odolnosti proti kavitaci. V podstatě jde o modifikovanou Kaplanovu turbínu, její princip spočívá v tom, že kapalina vstupuje do oběžného kola ve směru osy rotace a na výstupu obíhá proti směru rotace kola, voda pak vstupuje do sací trouby s určitou rotační složkou, jak uvádí [6] a [8]. Jedná se o dvoulopatkovou turbínu, jak je vidět na obr.11, u které nemusí být použitý rozvaděč a kterou je možno regulovat pouze pomocí změny otáček. Tato turbína pracuje s vyššími otáčkami (proto ji řadíme mezi rychloběžné turbíny) než např. Kaplanova turbína a za určitých okolností zde nemusí být použita ani převodovka. Jednou ze základních myšlenek při hydraulickém návrhu byla absence rozvaděče. Při této skutečnosti pak voda teče na oběžné kolo bez obvodové složky rychlosti ( $v_{u1} = 0$ ) a Eulerova turbínová rovnice přejde ze svého původního vyjádření:

$$g \cdot H \cdot \eta_h = u_1 \cdot v_{u1} - u_2 \cdot v_{u2} \quad (3.1)$$

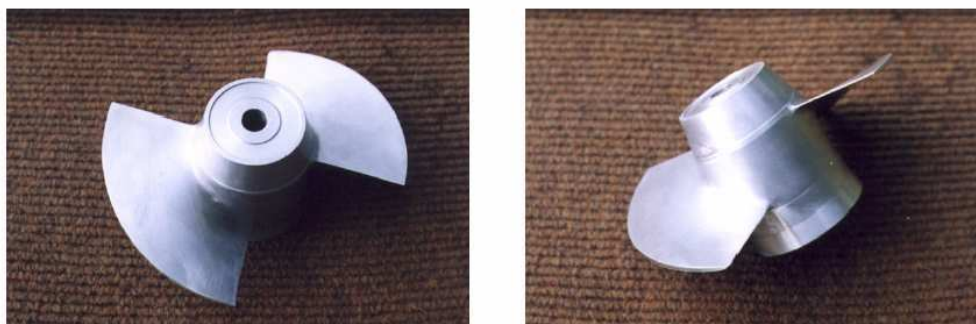
na tvar, kdy složka rovnice (3.1)  $u_1 \cdot v_{u1} = 0$ , pak:

$$g \cdot H \cdot \eta_h = -u_2 \cdot v_{u2} \quad (3.2)$$

, kde:  $u_1$  - obvodová rychlost na vstupu do oběžného kola turbíny  
 $u_2$  - obvodová rychlost na výstupu z oběžného kola turbíny  
 $v_{u1}$  - obvodová složka absolutní rychlosti na vstupu  
 $v_{u2}$  - obvodová složka absolutní rychlosti na výstupu  
 $\eta_h$  - hydraulická účinnost  
 $H$  - čistý spád  
 $g$  - tíhové zrychlení

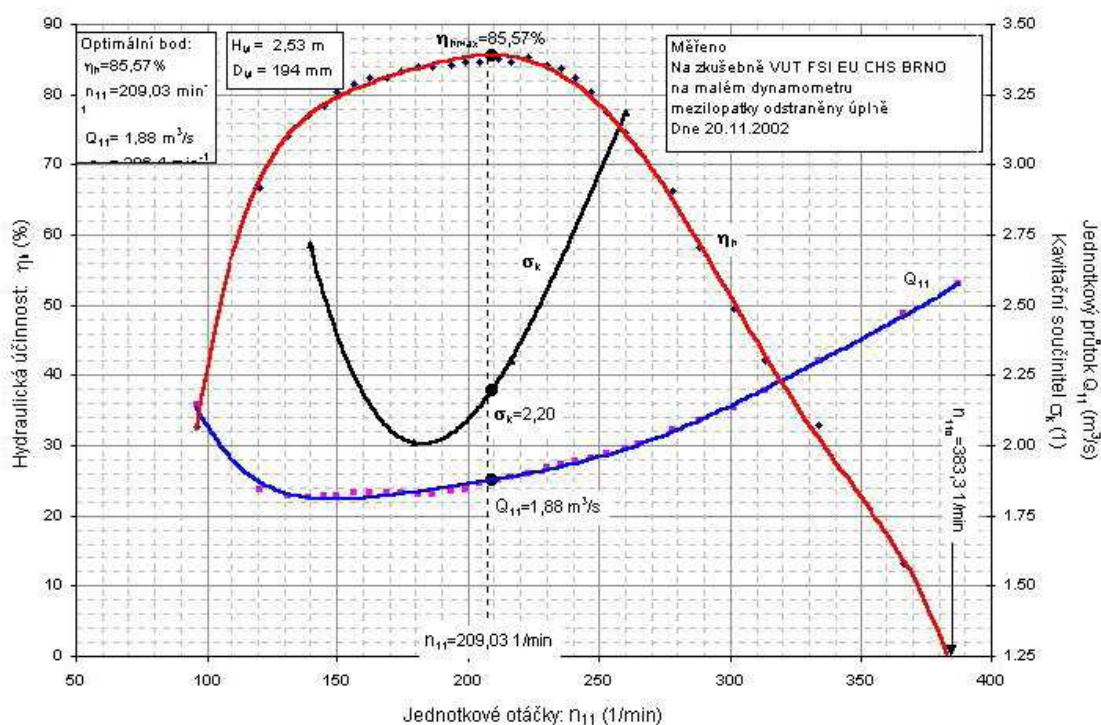
Díky odstranění rozvaděče klesne i hodnota hydraulických ztrát, které byly způsobeny jeho hustou lopatkovou mříží.





Obr.11 Oběžné kolo Vírové turbíny, převzato z [9]

Charakteristika modelové vírové turbíny 2-VT-194 v turbínové oblasti, závislost:  $[Q_{11}; \eta_h; \sigma_k = f(n_{11})]$



Obr.12 Příklad charakteristiky Vírové turbíny v turbínové oblasti, převzato z [6]

V tabulce 2 je uvedeno porovnání Kaplanovy a Vírové turbíny, podle [10]:

	Kaplanova turbína	Vírová turbína
vstup na turbínu:	- kapalina vstupuje do oběžného kola s předrotací - musí se použít nákladný rozvaděč	- kapalina vstupuje bez předrotace - nepoužívá se rozvaděč
výstup z turbíny:	- kapalina vystupuje bez rotační složky - může dojít k odtržení mezní vrstvy, což způsobí větší hydraulické ztráty	- výstup kapaliny z oběžného kola s určitou rotační složkou, díky které potom nedochází k odtržení mezní vrstvy v savce - mnohdy není potřebná převodovka
Eulerova rovnice:	$g \cdot H \cdot \eta_h = u_1 \cdot v_{u1}$	$g \cdot H \cdot \eta_h = -u_2 \cdot v_{u2}$

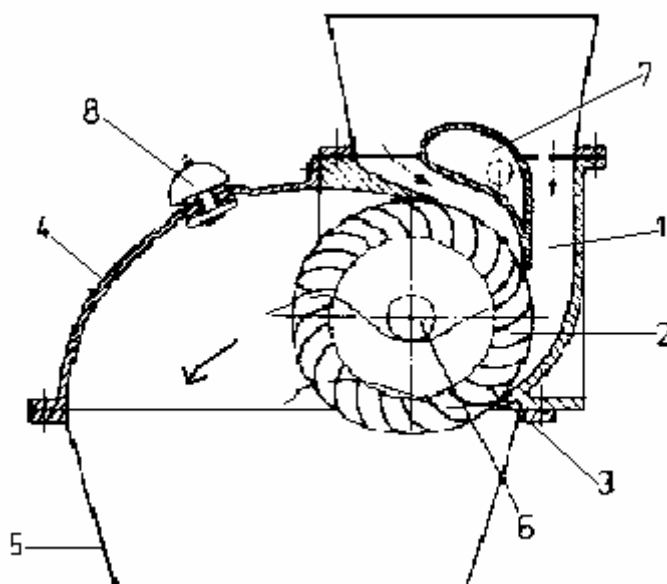
Tab.2 Porovnání Kaplanovy a Vírové turbíny



### 3.3 BÁNKIHO TURBÍNA

Vynalezl ji Donát Bánki v roce 1918 a patří k hydraulicky, konstrukčně a technologicky nejjednoduššímu a nejsnazšímu zvládnutelnému řešení vodních turbín pro MVE. Jedná se o radiální, rovnotlakou turbínu s dvojnásobným průtokem vody. Používá se pro spády 2 – 30 m (max. 200 m) a průtoky  $0,02 - 2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (max.  $9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), její účinnost se běžně pohybuje v rozsahu 78 – 84 %. Svým rozsahem výkonu od 1 do 1000 kW je to tedy velmi vhodná turbína pro MVE. Pracuje na následujícím principu: voda je vstupním tělesem 1, jak ukazuje obr.13 přiváděna k části vnějšího obvodu oběžného kola 2 (hustě osazeného dlouhými lopatkami), protéká jeho lopatkovou mříží 3, kde předá asi 79 % z celkového výkonu turbíny. Dále pokračuje do prostoru uvnitř oběžného kola a odtud znovu přes lopatkovou mříž, kde předá zbylých 21 % z celkového výkonu a směřuje do tělesa turbíny 4 (protéká tedy lopatkovou mříží hned dvakrát, přičemž první průtok je dostředivý a druhý je odstředivý), těleso 4 je spojeno s odpadní šachtou nebo se savkou 5. Oběžné kolo je uloženo na horizontální hřídeli 6 (je možné i vertikální provedení uspořádání turbíny). Regulace průtoku se provádí většinou klapkou 7 ve vstupním tělese. Těleso je opatřeno zavzdušňovacím ventilem 8, jak je uvedeno v [11].

Tato turbína se hojně využívá na malých tocích, kde by jiné typy turbín nedosáhly požadovaných parametrů a nebo byly ekonomicky nevýhodné. Je výpočetně a výrobně velmi jednoduchá, na její konstrukci nejsou potřeba žádné speciální materiály, značně okysličuje vodu a není náchylná na kavitaci. Má však i své omezení a to, že je pro danou oblast vhodná pouze tehdy, jeli její průměr  $D_1$  5 – 10 krát menší, než její spád  $H$  a také se nehodí tam, kde hrozí vzestup spodní vody, protože by pak hrozilo brodění kola ve vzduaté hladině a tím by docházelo ke snížení účinnosti turbíny. Dále se Bánkiho turbína nehodí z důvodů dynamicky namáhaných lopatek a také se stává, že při druhém průtoku lopatkami nepředá voda zbylých 21% energie nebo tento proud způsobuje zpomalování pohybu turbíny. Turbína také nemá savku a nedokáže tak využít výtokovou rychlost na výstupu.



Obr.13 Princip Bánkiho turbíny, převzato z [11]

1 - vstupní těleso, 2 - oběžné kolo, 3 - lopatka oběžného kola, 4 - těleso turbíny, 5 - savka, 6 - hřídel, 7 - regulační lopatka, 8 - zavzdušňovací ventil

### 3.4 DŮVODY VOLBY VÍROVÉ TURBÍNY

Jak už bylo uvedeno v úvodu kapitoly 3 je pro naši lokalitu nejvhodnější Vírová turbína. Ta byla vybrána, hlavně z těchto důvodů: je principiálně navržena pro stejné lokality jako je ta naše, tedy o nízkém spádu a malých průtocích. Je schopna pracovat už od spádu 1,1 m při průtoku  $0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , kdežto Kaplanova turbína při spádu 1,3 m a průtoku až  $0,48 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , jak je vidět v Q-H diagramu na obr.9. Tyto parametry Kaplanovy turbíny neodpovídají určeným parametrům lokality a ani ji nevyhoví její modifikace Semi-Kaplan, která je svými ideálními parametry rovněž mimo zvolenou oblast použití. Podle informací od zadavatele projektu byly dříve pokusy o instalaci Bánkiho turbíny, tato varianta však nebyla realizována, protože Bánkiho turbína nemá savku a tak nedokáže plně využít spád této lokality. A proto i přes mnoho jejích výhod pro menší MVE Bánkiho turbína nebude pro realizaci tohoto projektu použita. Mezi další výhody Vírové turbíny patří fakt, že při výstupu z oběžného kola nedochází v savce k odtržení mezní vrstvy, jako je tomu u Kaplanovy turbíny. Při zahrnutí finančního hlediska je cena oběžného kola Vírové turbíny asi 2x nižší než cena Kaplanovy turbíny, to je způsobeno tím, že 70 – 75 % ceny oběžného kola je tvořeno ekonomicky nákladným rozvaděčem a pláštěm. U Vírové turbíny, díky její rychloběžnosti nemusí být použita ani převodovka a dojde tedy k další úspoře finančních prostředků, pokud ale bude dosažen požadovaný počet otáček turbíny pro správnou funkci generátoru.

### 3.5 VÝPOČET ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ VÍROVÉ TURBÍNY

Při návrhu základních parametrů turbíny vycházíme z optimálního průtoku  $Q_{op} = 0,12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a ze spádu  $H = 1,67 \text{ m}$ , které byly určeny v předcházející kapitole, potom:

a) teoretický výkon  $P_{th}$ :

$$P_{th} = Q_{op} \cdot H \cdot \rho \cdot g = 0,12 \cdot 1,67 \cdot 998,2 \cdot 9,81 \quad (3.3)$$

, kde:  $Q_{op} = 0,12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$   
 $H = 0,167 \text{ m}$   
 $\rho = 998,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$   
 $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

$$P_{th} = 1962,4 \text{ W}$$

b) specifické otáčky  $n_s$ :

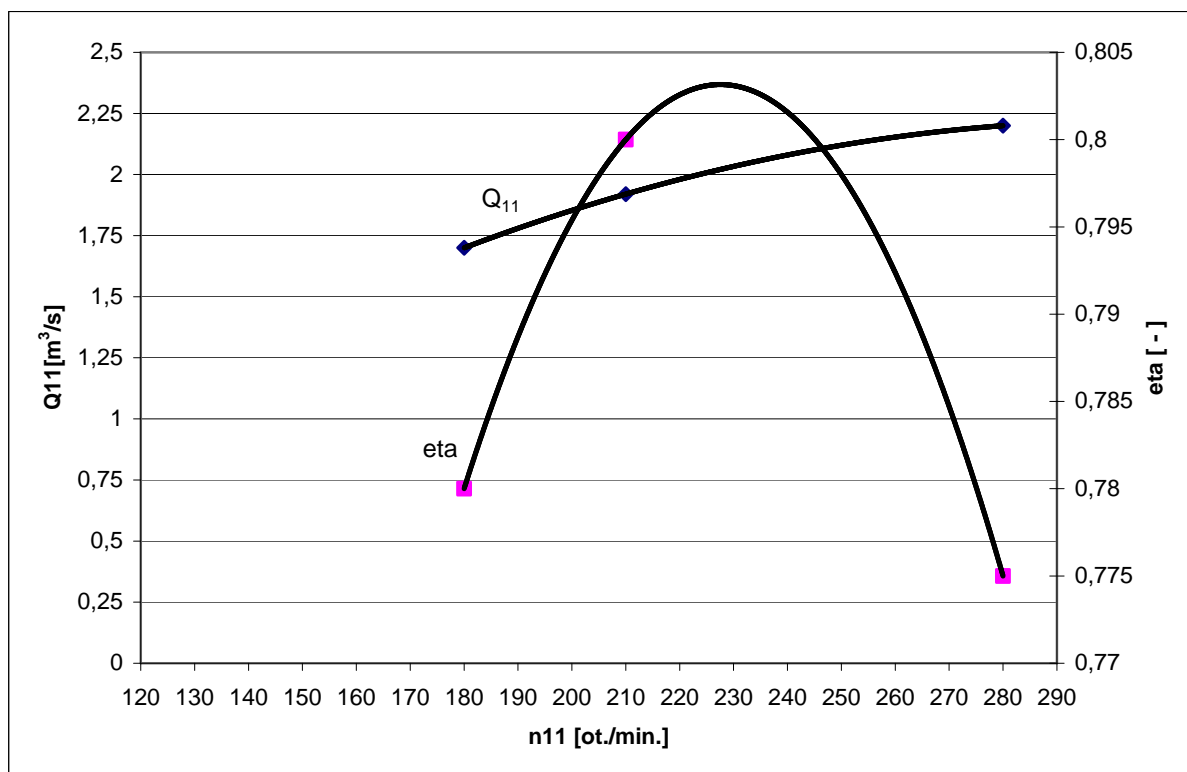
$$n_s = 1,16603 \cdot \frac{n_{MS}}{H} \cdot \sqrt{\frac{P_{th}}{\sqrt{H}}} = 1,16603 \cdot \frac{1500}{1,67} \cdot \sqrt{\frac{1,9624}{\sqrt{1,67}}} \quad (3.4)$$

, kde:  $n_{MS} = 1500 \text{ ot./min.}$  (určené otáčky generátoru, resp. asynchronního elektromotoru)  
 $H = 1,67 \text{ m}$   
 $P_{th} = 1962,4 \text{ W} = 1,9624 \text{ kW}$

$$n_s = 1290,6 \text{ ot.} \cdot \text{min.}^{-1}$$

c) z charakteristiky přímoproudé Vírové turbíny viz. graf 3 byly určeny pro optimum turbíny tyto hodnoty jednotkového průtoku  $Q_{11}$ , jednotkových otáček  $n_{11}$  a celkové účinnosti  $\eta_c$ :

$$\begin{aligned} Q_{11} &= 2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \\ n_{11} &= 225 \text{ ot.} \cdot \text{min.}^{-1} \\ \eta_c &= 0,80 \end{aligned}$$



Graf.3 Část měřené charakteristiky Vírové turbíny v oblasti optima

d) ze vzorce pro jmenovitý průtok  $Q_{11}$  rovnice (3.5) si vyjádříme průměr turbíny  $D$  a pomocí zjištěných hodnot  $Q_{11}$  vypočítáme  $D$ :

$$Q_{11} = \frac{Q}{D^2 \cdot \sqrt{H}} \quad (3.5)$$

, potom  $D$ :

$$D = \sqrt{\frac{Q_{op}}{Q_{11} \cdot \sqrt{H}}} = \sqrt{\frac{0,12}{2 \cdot \sqrt{1,67}}} \quad (3.6)$$

, kde:  $Q_{op} = 0,12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$   
 $Q_{11} = 2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$   
 $H = 1,67 \text{ m}$

$$\underline{D = 0,2155 \text{ m}}$$

e) ze vzorce pro jmenovité otáčky  $n_{11}$  rovnice (3.7) si vyjádříme otáčky turbíny  $n_T$  a pomocí zjištěných hodnot  $n_{11}$  vypočítáme  $n_T$ :

$$n_{11} = \frac{n \cdot D}{\sqrt{H}} \quad (3.7)$$

, potom  $n_T$ :

$$n_T = \frac{n_{11} \cdot \sqrt{H}}{D} = \frac{225 \cdot \sqrt{1,67}}{0,2155} \quad (3.8)$$

, kde:  $n_{11} = 225 \text{ ot.} \cdot \text{min.}^{-1}$   
 $D = 0,2155 \text{ m}$

$$n_T = 1349,25 \text{ ot.} \cdot \text{min.}^{-1}$$

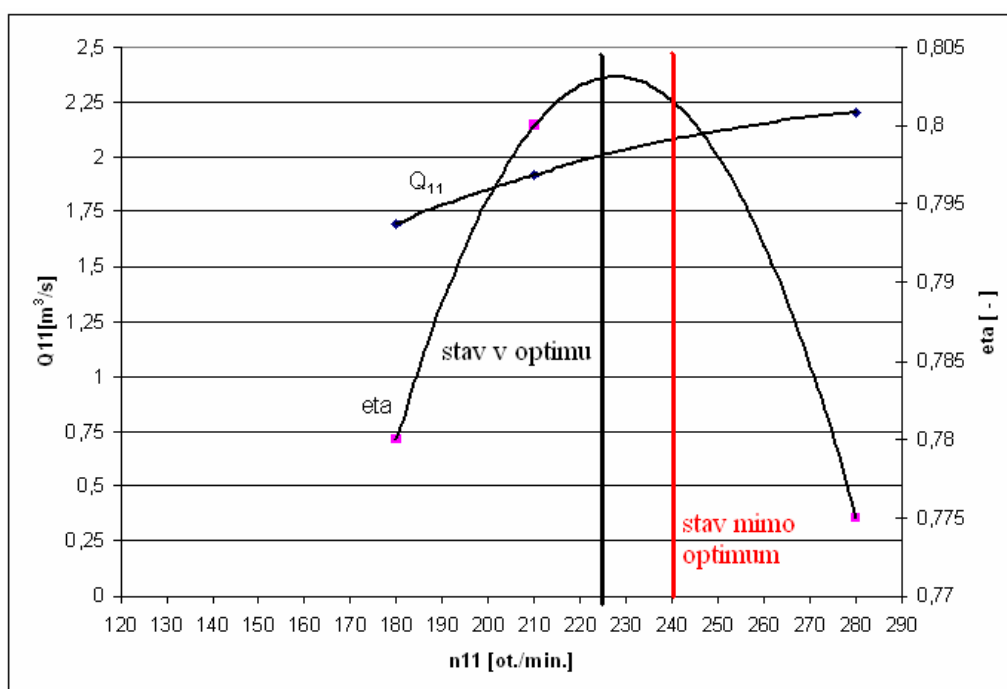
f) otáčky turbíny  $n_k$  při uvažování 1% skluzu generátoru:

$$n_{Tk} = n_T + \frac{n_T}{100} = 1349,25 + \frac{1349,25}{100} \quad (3.9)$$

, kde:  $n_T = 1349,25 \text{ ot.} \cdot \text{min.}^{-1}$

$$n_{Tk} = 1362,75 \text{ ot.} \cdot \text{min.}^{-1}$$

Vypočtené otáčky jsou pro zvolený generátor příliš malé a došlo by k tomu, že by nedodával el. energii do sítě a to z důvodů, protože aby asynchronní motor pracoval jako generátor musíme ho přetočit nad jeho synchronní otáčky, což je v našem případě  $n_{MS} = 1500 \text{ ot.} \cdot \text{min.}^{-1}$ . Řešením je změna průměru oběžného kola turbíny a to tak, aby byly turbínou dosaženy nadsynchronní otáčky  $n_p = 1520 \text{ ot.} \cdot \text{min.}^{-1}$ , touto změnou dojde i ke změně návrhového průtoku turbíny a samozřejmě i výkonu. Další jinou variantou řešení by byla změna jmenovitého průtoku  $Q_{11}$  a jmenovitých otáček  $n_{11}$ , tím by jsme se dostali mimo navrhované optimum turbíny a tak by došlo k poklesu účinnosti, jak ukazuje obr.14, a to nechceme.



Obr.14 Pokles účinnosti vlivem změny  $Q_{11}$  a  $n_{11}$

g) přepočít průměr oběžného kola  $D$  na průměr  $D_p$  pomocí rovnice (3.7), po vyjádření:

$$D_p = \frac{n_{11} \cdot \sqrt{H}}{n_p} = \frac{225 \cdot \sqrt{1,67}}{1520} \quad (3.10)$$

, kde:  $n_p = 1520 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$

$$\underline{D_p = 0,1913 \text{ m}}$$

h) přepočít průtok  $Q$  na průtok  $Q_p$  pomocí rovnice (3.5), po vyjádření:

$$Q_p = Q_{11} \cdot D_p^2 \cdot \sqrt{H} = 2 \cdot 0,1913^2 \cdot \sqrt{1,67} \quad (3.11)$$

, kde:  $D_p = 0,1913 \text{ m}$

$$Q_p = 0,0946 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

i) potom výkon  $P$ , s uvažováním celkové účinnosti  $\eta_c$  a se správnou hodnotou otáček  $n_p$ , aby generátor fungoval správně:

$$P = Q_p \cdot H \cdot \rho \cdot g \cdot \eta_c = 0,0946 \cdot 1,67 \cdot 998,2 \cdot 9,81 \cdot 0,80 \quad (3.12)$$

, kde:  $Q_p = 0,0946 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

$H = 1,67 \text{ m}$

$\rho = 998,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

$$\underline{P = 1237,6 \text{ W}}$$

### 3.6 VÝPOČET PARAMETRŮ TURBÍNY PRO VYŠŠÍ PRŮTOK

Protože je výsledný výkon získaný při průtoku  $Q_p = 0,0946 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  poměrně malý a při volbě optimálního průtoku  $Q_{op}$  bylo z dat z ČHMU zjištěno, že v řece je dostatek vody. Byl pro porovnání zvolen nový optimální průtok  $Q_{op2} = 0,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , pro který bylo zjištěno, že v řece byl po 89,5 % doby měření průtok větší než  $Q_{op2}$ . Poté následuje obdobný návrh turbíny jako v kapitole 3.5.

a) budeme brát v úvahu stejnou charakteristiku Vírové turbíny, kterou ukazuje graf. 3 a i stejné optimum turbíny, pak získáme stejné hodnoty:

$$\begin{aligned} Q_{11} &= 2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \\ n_{11} &= 225 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \\ \eta_c &= 0,80 \end{aligned}$$

b) ze vzorce pro jmenovitý průtok  $Q_{11}$  rovnice (3.5) si vyjádříme průměr turbíny  $D_2$  a pomocí zjištěných hodnot  $Q_{11}$  vypočítáme  $D_2$ :

$$D_2 = \sqrt{\frac{Q_{op2}}{Q_{11} \cdot \sqrt{H}}} = \sqrt{\frac{0,15}{2 \cdot \sqrt{1,67}}} \quad (3.13)$$

, kde:  $Q_{op2} = 0,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$   
 $Q_{11} = 2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$   
 $H = 1,67 \text{ m}$

$$\underline{D_2 = 0,241 \text{ m}}$$

c) ze vzorce pro jmenovité otáčky  $n_{11}$  rovnice (3.7) si vyjádříme otáčky turbíny  $n_2$  a pomocí zjištěných hodnot  $n_{11}$  vypočítáme  $n_2$ :

$$n_2 = \frac{n_{11} \cdot \sqrt{H}}{D_2} = \frac{225 \cdot \sqrt{1,67}}{0,241} \quad (3.14)$$

, kde:  $n_{11} = 225 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$   
 $D_2 = 0,241 \text{ m}$

$$n_2 = 1206,5 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

d) otáčky turbíny  $n_{k2}$  při uvažování 1% skluzu generátoru:

$$n_{k2} = n_2 + \frac{n_2}{100} = 1206,5 + \frac{1206,5}{100} \quad (3.15)$$

, kde:  $n_2 = 1206,5 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$

$$n_{k2} = 1218,6 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

Obdobně platí stejný princip jako v kapitole 3.5., kde vlivem nízkých otáček turbíny by opět nefungoval asynchronní elektromotor jako generátor. Dále by jsme musely přepočíst pomocí rovnic (3.10) a (3.11) průměr turbíny a průtok, aby jsme dosáhli požadovaných otáček. Tento postup by vedl na stejné výsledky jako v kapitole 3.5, pak by bylo  $D_P = D_{P2} = 0,1913 \text{ m}$  a  $Q_P = Q_{P2} = 0,0946 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

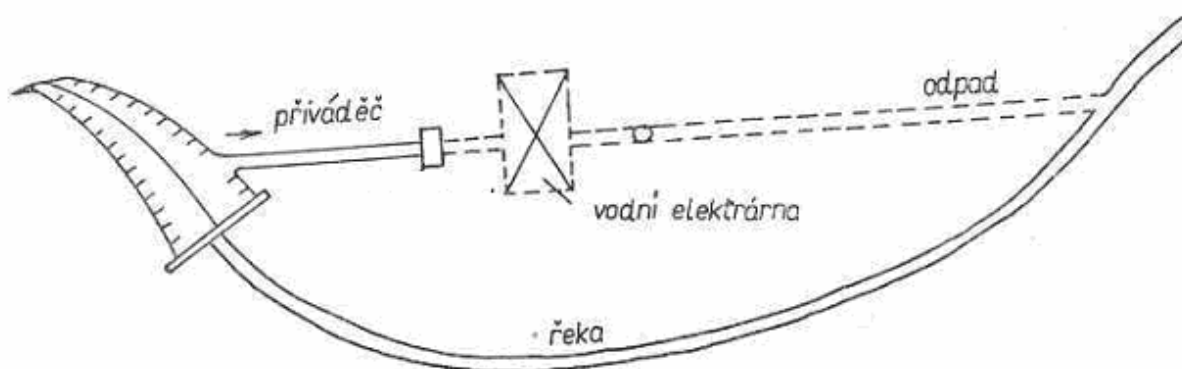
### 3.7 NÁVRH MOŽNÝCH ŘEŠENÍ

Z výše uvedených kapitol 3.5 a 3.6 vyplývá, že turbína pro daný optimální průtok a spád není schopna mít při přímém spojení s generátorem požadovanou rychloběžnost, aby byly dosaženy nadsynchronní otáčky  $1520 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ . Tyto otáčky lze dosáhnout pouze zmenšením průměru turbíny a tím i zmenšením optimálního průtoku pro turbínu, z čehož plyne i menší množství získané energie. Protože je v řece dostatek vody a je možné, že hodnota optimálního průtoku bude při realizaci projektu navýšena je varianta tohoto řešení zbytečně podhodnocená a nebude uskutečněna. Možným řešením vzniklého problému je spojení turbínového hřídele s hřídelí generátoru pomocí převodovky, kdy vhodným převodovým poměrem lze dosáhnout požadovaného počtu otáček tak, aby generátor fungoval správně. Pro představu o výsledcích řešení jsou předpokládané finanční zisky z jednotlivých variant uvedeny v kapitole 7.1 a to podle tohoto rozdělení:

- varianta A (přímé spojení hřídelí turbíny a generátoru) -  $Q_P = 0,0946 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $D_P = 0,1913 \text{ m}$
- varianta B (spojení hřídelí pomocí převodovky) -  $Q_{op} = 0,12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $D = 0,2155 \text{ m}$
- varianta C (spojení hřídelí pomocí převodovky) -  $Q_{op2} = 0,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $D_2 = 0,241 \text{ m}$

## 4 NÁVRH JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ MVE

Projekt bude řešen jako derivační elektrárna, schéma uspořádání je vidět na obr.15. Tato varianta byla vybrána, protože je již zde z dřívějších dob postaven vzdouvací objekt a na něho navazující přivaděč a tím dojde k částečné úspoře finančních prostředků vynaložených na potřebné stavební úpravy. U tohoto uspořádání voda opouští koryto řeky a je pomocí přivaděče vedena do nádrže, kde se bude akumulovat menší množství vody. Varianta s akumulací nádrží je zvolena z toho důvodu, aby nedocházelo při poklesu průtoku k tomu, že oběžné kolo turbíny nebude celé pod vodou a bude tak narušen jeho správný chod. Vše bude pojištěno snímači hladiny, které při poklesu hladiny v nádrži zastaví provoz turbíny. Turbína bude umístěna horizontálně, aby bylo zajištěno, jak již bylo řečeno, že oběžné kolo bude neustále pod vodou. Jako generátor, jak je tomu obvyklé u podobných MVE poslouží asynchronní elektromotor. Elektrárna bude umístěna v budově starého mlýna, z čehož vyplývá první omezení jejího návrhu, kdy se celé zařízení MVE svou velikostí musí vměstnat do místnosti pro to určené. S tím souvisí i montáž všech dílů pro elektrárnu, které musí projít zárubněmi dveří o rozměrech 1000 x 2200 mm nebo v dalším případě velkým oknem, které je v současné době zasklené, ale je demontovatelné a má přibližně rozměry 1400 x 3660 mm. Zvláštním požadavkem zadavatele je, aby v blízkosti elektrárny bylo umístěné historické vodní kolo, pro názornou ukázkou využití vody na tomto místě v minulosti.



Obr.15 Schéma derivační elektrárny

V dalších kapitolách jsou podrobně popsány všechny zařízení MVE a postup jejich návrhu. Při jejich konstrukci se vycházelo z návrhových parametrů dané lokality, které byly zjištěny výše a také z postupu výpočtu numerického modelování proudění. Modelování proudění je uvedeno v dalších kapitolách, ale při projektování tyto činnosti probíhali současně. Při volbě jednotlivých prvků systému bylo zvoleno co nejvíce komerčně vyráběných částí, tak aby splnily požadavky provozu a byla zajištěna určitá bezpečnost.

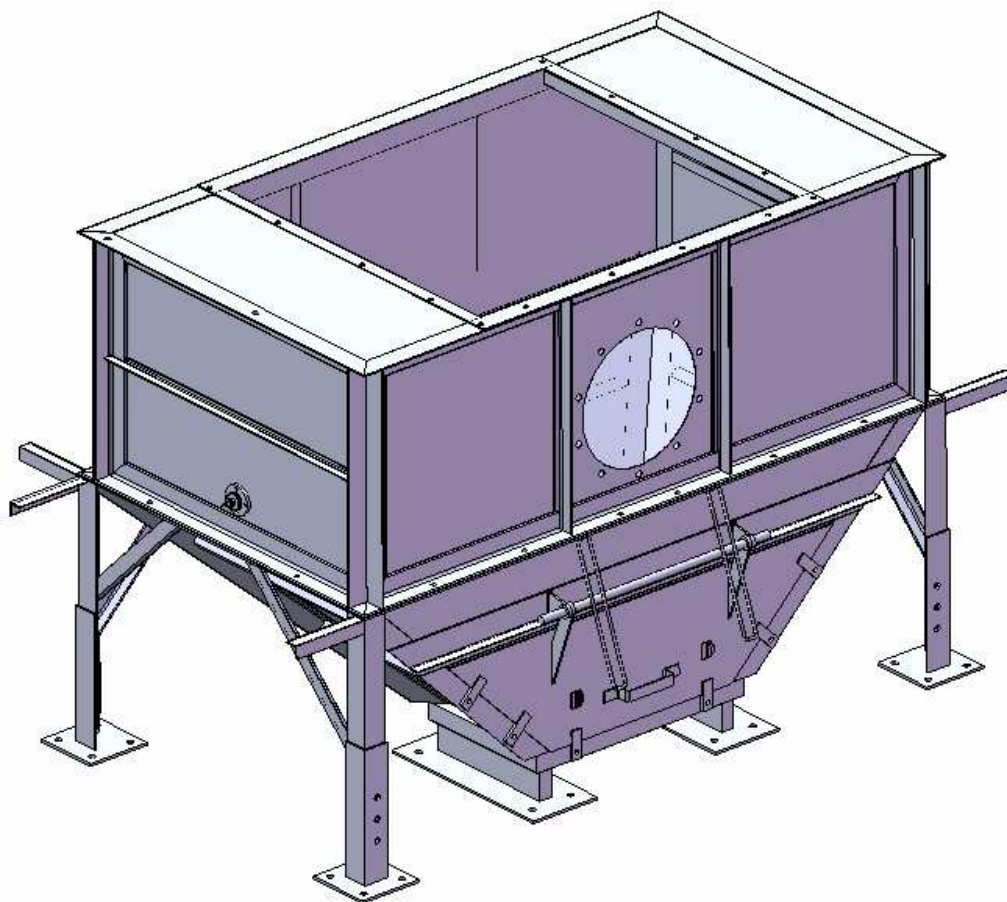
## 4.1 NÁDRŽ A RÁM NÁDRŽE

Jak již bylo řečeno dříve elektrárna bude řešena s nátokem vody do nádrže, která nahrazuje kašnu, odkud bude voda potrubím vedena k turbíně. Důvod použití nádrže je ten, že nádrž bude plnit funkci akumulčního prvku pomocí, kterého bude zajištěno, že v případě poklesu průtoku bude oběžné kolo turbíny plně pod vodou a budeme moci na tento pokles reagovat. Opačný stav, kdy by oběžné kolo nebylo zcela zaplněné vodou by způsobil nerovnoměrný chod turbíny, což by negativně ovlivňovalo její výkon dodávaný do elektrizační sítě. Dále by docházelo k dynamickému namáhání lopatek turbíny a mohlo by tedy dojít k jejich nevratnému poškození. Výška hladiny vody v nádrži bude sledována pomocí snímače hladiny, který případě poklesu pod určitou hodnotu celý systém odstaví nebo dá informaci řídicímu systému, ten pak upraví výšku hladiny tak, aby mohla MVE pokračovat v provozu. Tato varianta regulace počítá s možností regulovat výšku hladiny v přivaděči a tedy i v nádrži pomocí elektronicky ovládaného stavidla umístěného na odběru vody z řeky a také s elektronicky uzavíratelným šoupátkem před turbínou.

Prvním důležitým krokem při návrhu nádrže je volba použitého materiálu, ten by měl mít dostatečnou pevnost, být dobře svařitelný, ekologicky nezávadný a měl by být odolný proti korozi v prostředí vody. Jako vhodný materiál byla vybrána nerezová ocel. Tyto oceli jsou chromové slitiny se železem obsahující 12 až 30 % chromu, až 30 % niklu nebo do 24 % manganu při určitém množství molybdenu, křemíku, mědi, titanu, niobu, dusíku apod., ale v množství nejvýše jen několika procent. Chrom zajišťuje pasivitu těchto slitin a je proto rozhodujícím prvkem pro dosažení odolnosti k celkové korozi. Nerezové oceli jsou v některých prostředích náchylné k místním druhům koroze, jako je bodová, štěrbínová, mezikrystalová nebo korozní praskání. Ty však mohou být vyloučeny vhodným výběrem oceli pro dané podmínky. Typ oceli, který bude použit má označení ČSN 17 240, nově značená ČSN 10088-1 případně podle jiných mezinárodních norem AISI 304 nebo DIN W.Nr. 1.4301. Tato austenitická chromniklová nerezová ocel má pevnost v tahu  $R_m 520 - 750 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ , mez kluzu  $R_{p 0,2 \text{ min}} 210 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ , má dobrou odolnost proti korozi v prostředí běžného typu (voda, slabé alkálie a slabé kyseliny), je nemagnetická, nekalitelná, má sklon ke zpevňování za studena při tažení. Dlouhodobě ji lze vystavit teplotám do  $350^\circ\text{C}$ , má dobrou svařitelnost. Z důvodu svého nízkého obsahu uhlíku po svařování u síly plechu do 6 mm je odolná proti mezikrystalické korozi i bez dodatečné tepelné úpravy. Používá se zejména v potravinářství, pro rozvody pitné vody a zařízení ČOV. Její chemické složení vyhovuje normě pro použití výrobků pro potraviny a pitnou vodu, jak uvádí [12].

Rozměry a tvar nádrže vychází z omezení dané velikostí místnosti, kde bude nádrž umístěna a také z průběhu výpočtu modelu proudění v nádrži. Tvar nádrže jak ukazuje obr.16 je zvolen v závislosti na předpokladu, že v horní části je akumulční prostor, který je důležitý pro nátok vody do potrubí. Proto velikost horního vstupního otvoru nádrže, který zajišťuje přívod vody z přivaděče je volen tak, aby byla maximálně využita šířka přívodu po celé délce nádrže. Ve výsledném spojení přívodu a nádrže je tento otvor zkrácen dnem přívodu na vhodnou délku danou polohou přepadové desky. Na čelní straně nádrže je pak kruhový otvor o průměru 500 mm, kudy bude voda proudit dále potrubím k turbíně. Poloha tohoto otvoru a jeho průměr byly zvoleny v závislosti na průběhu numerické modelu proudění, kdy se tyto použité rozměry po vizuálním vyhodnocení proudění osvědčily. Na levé straně bude umístěn snímač výšky hladiny a to ve vzdálenosti 650 mm od zadní stěny nádrže a 750 mm od horní stěny nádrže, jeho poloha je určena v závislosti na poloze potrubí, kde bude umístěna turbína a to tak aby při poklesu hladiny včas s danou přesností měření odpojil systém, typ snímače je určen v kapitole 4.2. Dolní část nádrže bude mít šikmé stěny směrem dovnitř, aby jsme zmenšily celkový objem nádrže a zvýšili možnost rychlého





Obr.16 Nádrž

zaplnění horního akumulčního prostoru. Tato úprava stěn nádrže by také měla vytvořit stabilnější udržení hladiny v horní polovině nádrže. Zúžení rovněž využijeme k částečnému usazování hrubých nečistot, proto také bude mít nádrž v dolní části umístěná odkalovací dvířka, pro vypouštění usazenin. Toto usazování nemá být náhradou česlí, ty budou umístěny v dostatečné vzdálenosti od vstupu do nádrže a jejich návrh je uveřejněn v kapitole 4.6. Odkalovací dvířka jsou uložena na dvou pantech, které jsou uchyceny k rámu nádrže. Pro zajištění v otevřené poloze mají na horní stěně dvířek dva závěsy, proti kterým jsou umístěna zachytňovací oka pro snadné zachycení v otevřené poloze. V zavřené poloze jsou dvířka zajištěna šesti šrouby, které musí být ze stejného materiálu jako je nádrž, aby nedocházelo k bimetalické korozi. Všechny základní rozměry nádrže jsou uvedeny v příloze 5 – sestava nádrže.

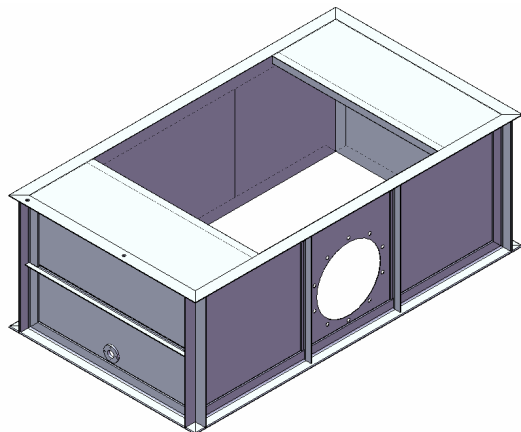
Protože na stěny nádrže budou působit poměrně velké tlaky, kterým samotný plech o tloušťce 3 mm a svary těchto plechů nejsou schopny pevnostně odolat je nutné, aby nádrž měla také rám. Tento rám by měl být vyroben z normalizované profilované oceli ČSN 17 240 a to tak, aby zvýšil pevnost nádrže jako celku, který by pak snáze odolal působícím tlakům. Střední tlaky, které na jednotlivé plochy nádrže působí lze zjistit z numerického modelu proudění a jsou uvedeny v tab.3. Seznam všech použitých profilů je uveden v kusovníku použitých profilů pro sestavu nádrže v příloze 5, kde je i popsána celková délka a hmotnost daného profilu. Kromě toho, že rám zajišťuje pevnost celé nádrže, bude nádrž pomocí rámu uložena v prostoru. K tomuto uložení slouží posuvné patky rámu, které vytvoří styčnou plochu mezi nádrží a dnem místnosti, kde bude nádrž uložena. Proto by měly být tyto patky k nádrži resp. jejímu rámu přišroubovány až při montáži. Dalším kotvicím prvkem jsou postranní profily L pomocí nichž je nádrž upevněna vzhledem ke stěnám místnosti a bude tak zajištěno, že nedojde v případě vysoko položeného těžiště nádrže k jejímu převrnutí.

Umístění plochy na nádrži	Velikost působícího tlaku [ Pa ]	Velikost působící síly [ N ]
horní stěna	1 567	2 053
čelní horní stěna	5 909,7	11 524
čelní dolní stěna	13 652,7	17 476
pravá horní stěna	5 971,5	6 927
pravá dolní stěna	13 721,2	13 859
levá horní stěna	5 974,8	6 931
levá dolní stěna	13 719,8	13 857
zadní horní stěna	5 965	12 825
zadní dolní stěna	13 644,3	24 560
stěna dna	18 254	7 120

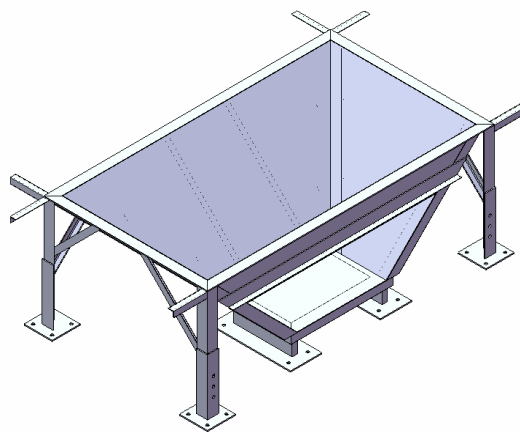
Tab.3. Hodnoty středních tlaků a sil působících na plochy nádrže

Nezbytnou součástí návrhu rámu jsou jeho pevnostní výpočty, které přesahují rámec této diplomové práce a nebyly provedeny, proto je doporučeno před realizací projektu provést výpočty pomocí vhodného výpočetního programu a v případě nevyhovujících parametrů rám správně upravit, aby vyhovoval požadavkům zatížení.

Z důvodu transportu a umístění nádrže do místnosti bude nádrž a tedy i její rám rozdělena na dvě poloviny, jak ukazuje obr.17 a to v rovině, která ji rozděluje na horní akumulací prostor a dolní odkalovací část. Tyto dvě části budou smontovány až na místě při montáži pomocí šroubů rovnoměrně rozložených po obvodu spoje. Mezi spojem obou dílů bude gumové těsnění pro zajištění těsnosti spoje. Takto rozdělená nádrž bude mít správné



horní (akumulační) část nádrže



dolní (odkalovací) část nádrže

Obr.17 Rozdělení nádrže

rozměry, aby mohla při montáži projít velkým otvorem, který má rozměry 1400 x 3660. Horní část nádrže má rozměry 1460 x 900 x 2560 a dolní část 1848 x 995 x 3160, nádrž tak svými rozměry vyhovuje montážním podmínkám. Její jednotlivé základní rozměry jsou názorněji vidět v příloze 5 – sestava nádrže. Pro montáž je také důležitá hmotnost jednotlivých dílů nádrže, kdy horní část bude mít přibližně hmotnost 431 kg a dolní část 620 kg. S těmito díly se bude manipulovat při montáži ve smontovaném stavu, proto na jejich společnou celkovou hmotnost, která je 1051 kg bude vybrán vhodný jeřáb se správnou nosností pro instalaci jednotlivých dílů MVE.

## 4.2 VOLBA SNÍMAČE HLADINY

Snímače hladiny jsou elektronická zařízení, která slouží k měření výšky hladiny v otevřených nebo uzavřených nádobách a to buď kapalných nebo sypkých látek. Z velkého množství snímačů fungujících na různých principech bylo pro tento proces měření výšky hladiny vody v nádrži vybrán snímač, který měří výšku hladiny v závislosti na velikosti hydrostatického tlaku a to tak, že výška hladiny  $h_h$  se vyhodnocuje z hydrostatického tlaku sloupce kapaliny v nádrži obr.18. Výsledná výška je závislá na hustotě a tedy i teplotě měřené kapaliny. K snímání hydrostatického tlaku se většinou využívá snímač s polovodičovými tenzometry. Při výpočtu výšky hladiny vycházíme ze vzorce:

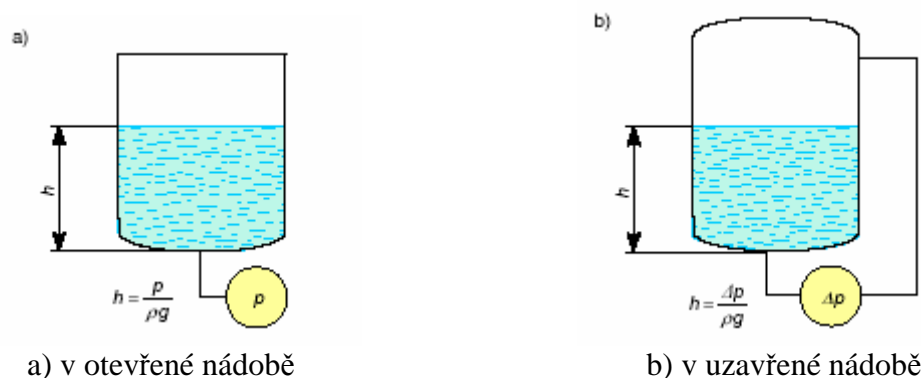
$$h_h = \frac{p_h}{\rho \cdot g} \quad (4.1)$$

, kde:  $p_h$  – hodnota hydrostatického tlaku [Pa]

$\rho$  – hustota kapaliny [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

$g$  – tíhové zrychlení [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ]

Výhodou tohoto principu je nezávislost měřené výšky hladiny na tvorbě pěny, turbulencích a elektrických vlastnostech měřené kapaliny, nevýhodou je závislost měření na hustotě této kapaliny, jak uvádí [13].



Obr.18 Měření hydrostatického tlaku, převzato z [13]

Pro měření hladiny vody v otevřené nádrži při teplotě -10 až 25 °C, pro relativní tlaky -0,006 až 0,0183 MPa, kdy měření bude probíhat spojitě a to v rozsahu výšky hladiny od 0 až 1,3 m. Voda jakožto měřené medium je elektricky vodivé, nebude docházet k jejímu ulpívání nebo hromadění na povrchu, ale budou se v důsledku horního přítoku do nádrže tvořit víry a značné turbulence. K tvorbě pěny by docházet nemělo nebo jen zcela výjimečně ve velmi malém množství a pára by se na povrchu hladiny, také neměla objevovat. Vzhledem k předpokládaným větším turbulencím v nádrži bude použito bezdotykového měření výšky hladiny. Jako výstup je požadovaný analogový signál, který bude veden do regulačního zařízení MVE. Podle těchto zjištěných závěrů se nabízí pro splnění zadáných podmínek dvě varianty řešení měření výšky hladiny a to:

- hydrostatický snímač umístěný přímo na povrchu nádrže
- hydrostatický snímač umístěný ve vnitřku nádrže, kde bude uložen v trubce

Z těchto možností byla vybrána první varianta, protože se jeví jako nejsnáze realizovatelná, kdy se snímač pomocí speciální příruby upne na stěnu nádrže, přesná poloha snímače na stěně byla popsána v předešlé kapitole 4.1. Pro správné vyhodnocení tlaku je důležitá rychlost v blízkosti stěny, kde bude snímač umístěn. Po vyčíslení rychlosti z výpočtu proudění dosahuje rychlost u stěny velikosti  $0,12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , měla by tedy být dosti malá, aby snímač při správně provedené kalibraci splnil svoji funkci. Druhá varianta hydrostatického snímače

uloženého v trubce je také vhodná, pomocí uložení v trubce lze dosáhnout podstatného tlumení turbulencí a vírů, pokud by trubka byla umístěna mimo nátok do potrubí např. ve vhodné vzdálenosti mezi rohem nádrže a nátokem.

Pro realizaci varianty s hydrostatickým snímačem umístěným ve stěně jsem zvolil hydrostatický snímač typ LMK 351 od výrobce BD SENSORS na obr.19. Tato nerezová vestavná sonda se skládá z kapacitního keramického senzoru bez olejové náplně s vysokou odolností proti agresivním mediím a čelní membrány. Sonda byla navržena speciálně pro procesní měřicí techniku a pro měření výšky hladiny. Použitím kapacitního keramického senzoru je dosaženo vynikajících měřicích vlastností, vyznačuje se dlouhodobou stabilitou a nízkou chybou vlivem teploty. Používá se pro jmenovitý tlak 0 ... 0,004 MPa do 0 ... 1 MPa tj. (0 ... 400 mm H<sub>2</sub>O do 0 ... 100 m H<sub>2</sub>O) s přesností dle IEC 60770: 0,35 % FSO, další pak i 0,25 % FSO.



Obr.19 Hydrostatický snímač LMK 351

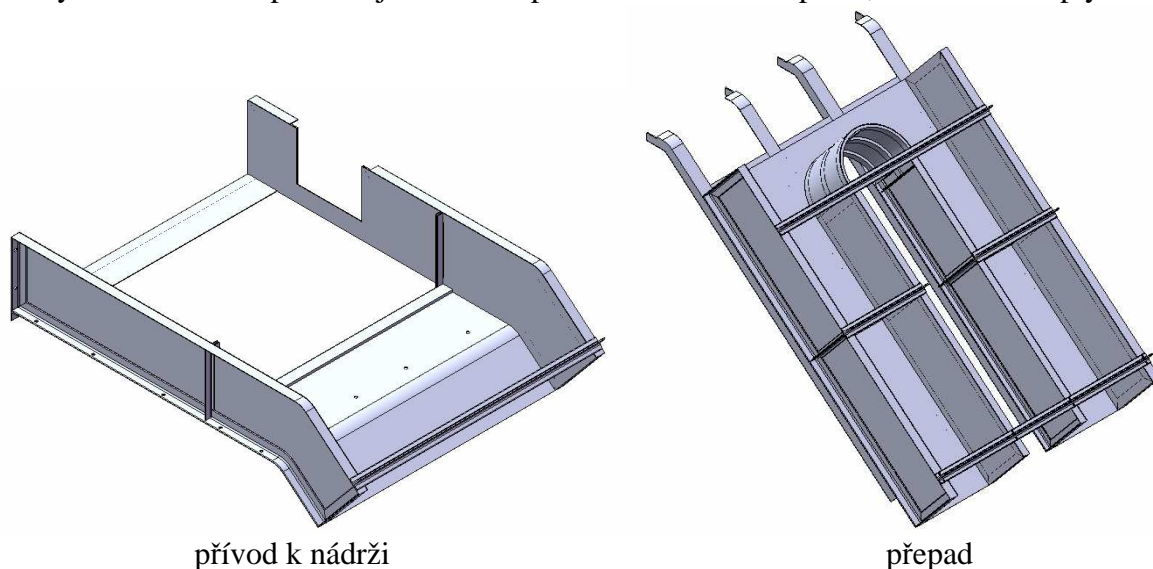
Tlaková přípojka je dodávána v nerezové oceli 1.4571 nebo pro obzvláště agresivní media v PVDF nebo PVC. Díky čelnímu umístění tlakových senzorů je umožněno nasazení také v hustých nebo znečištěných médiích. Senzor je k tlakové přípojce těsněn pomocí těsnění z FKM. Hlavní oblasti použití snímačů je měření výšky hladiny, chemický průmysl, lékařská technika a farmaceutický průmysl. Technické parametry použitého snímače:

- rozsah relativních tlaků: 0,025 MPa
- výška hladiny: 2,5 m
- maximální přetížení 0,6 MPa
- maximální podtlak -0,05 MPa
- přesnost: standardní  $\leq \pm 0,35$  % FSO  
další  $\leq \pm 0,25$  % FSO , pro toto zadání to znamená, že bude výška hladiny měřena s přesností  $\leq \pm 8,75$  mm, případně při dosažení větší přesnosti ( $\leq \pm 0,25$  % FSO) bude měřeno s přesností  $\leq \pm 6,25$  mm
- dlouhodobá stabilita  $\leq \pm 0,1$  % FSO / rok
- časová odezva < 200 ms
- rychlost měření 5/s
- chyba pro nulu a rozpětí  $\leq \pm 0,1$  % FSO / 10 K
- provozní a skladovací podmínky: - měřené medium -25 až 125 °C
  - elektronika / okolí -25 až 85 °C
  - skladování -40 až 100 °C

### 4.3 PŘÍVOD K NÁDRŽI A PŘEPAD

Poté co voda opustí venkovní přivaděč je v místnosti, kde je umístěna MVE vedena pomocí přívodu obr.20 do nádrže. Přívod je vyroben ze stejného chromniklové nerezové oceli jako celá nádrž, tedy ČSN 17 240. Svými vnitřními rozměry navazuje na rozměry venkovního přivaděče a má šířku 1400 mm a výšku 390 mm. Pro správný nátok vody je důležitá jeho čelní stěna, která tak hradí průtok do nádrže. Poloha této stěny byla zvolena podle numerického modelu proudění v přivaděči na turbínu a je vzdálena 1180 mm od zadní stěny přívodu. Tuto stěnu tvoří přepadová deska velkého (přepadového) stavítka, jehož konstrukce je popsána na konci této kapitoly. Dalším důležitým rozměrem je vstupní otvor z přívodu do nádrže, jeho velikost je zvolena, jak již bylo řečeno v kapitole 4.1 a to tak aby byla maximálně využita šířka přívodu a zároveň dodržena správná poloha přepadové desky. Všechny tyto základní rozměry jsou uvedeny v příloze 6 – sestava přívodu a přepadu. Podle uvedených maximálních rozměrů 2136,5 x 600 x 1506 je prokázáno, že přívod při montáži projde vstupním otvorem a bude mít hmotnost 115 kg. Přiváděné množství vody slouží v první řadě hlavně pro možnost zpracování turbínou, ale je zde zvláštní požadavek zadavatele, aby v blízkosti MVE bylo umístěné vodní kolo. Proto je v boční stěně přívodu obdélníkový otvor o rozměrech 400 x 293 mm, na který bude napojen přívod k tomuto vodnímu kolu.

Stejně jako u nádrže, aby byla zachována požadovaná pevnost celého přívodu musí mít i tento díl vlastní rám. K jeho konstrukci bude opět použito normalizované profilové nerezové oceli ČSN 17 240, kdy seznam jednotlivých profilů je uveden v kusovníku použitých profilů pro sestavu přívodu a přepadu v příloze 6, tato příloha obsahuje i seznam použitých profilů pro přepad, protože tyto dvě součásti jsou umístěny na jednom výkresu sestavy. Koncová část přívodu je skloněná pod úhlem 140° a to proto, že na ni bude plynule



Obr.20 Přívod a přepad

navazovat přepad, který by měl odvést větší množství vody v případě náhlého zvýšení hladiny vody v přívodu. Tento přepad bude sloužit jen jako záloha v případě poruchy, protože funkci regulačního prvku hladiny by mělo plnit elektronicky ovládané stavidlo, případně jalový přepad, který je součástí venkovního přivaděče.

Přepad tedy plynule navazuje na skloněný konec přívodu a jeho vnitřní vstupní rozměry jsou stejné jako rozměry přívodu 1400 x 390 mm. Za krátkou vstupní částí je rozdělen na dva stejně velké kanály jak ukazuje obr.20, aby bylo možné vest skrz přepad přívodní potrubí k turbíně. Pro jeho výrobu bude použito opět nerezové chromniklové oceli

ČSN 17 240, jejíž konkrétní vlastnosti a výhody použití jsou uvedeny v kapitole 4.1. Z důvodů zaručení požadované pevnosti bude mít i přepad, jako předešlé díly MVE, svůj rám, který je zvláště zesílen v části, kde voda čelně dopadá na horní ohnutou plochu meziprostoru obou kanálů. Pomocí rámu bude realizována celá montáž přepadu k příslušným částím MVE a to hlavně pomocí šroubů, způsob této montáže je podrobně popsán v montážním postupu dílů MVE. Z přílohy 6 sestava přívodu a přepadu je vidět, že přívod svými maximálními rozměry 2431 x 393 x 1506 projde vstupním otvorem do místnosti. Další důležitou hodnotou pro montáž je přibližná hmotnost přepadu, která činí 334 kg.

Na horní ploše rámu přívodu bude umístěné přepadové stavítko, jehož desky mají za úkol hradit průtok do nádrže, jak bylo popsáno v kapitole 4.1. A také by měly v případě dosažení určitého průtoku, který byl stanoven na  $0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  působit jako přepad pro odvod většího množství vody než je stanovený průtok. Z důvodu, aby byla zajištěna ovladatelnost přepadových desek v případě, když by bylo nutné tuto přepadovou desku zvednout a umožnit průtok korytem bez jeho využití turbínou, budou desky součástí komerčně vyráběného stavítka obr.21 se dvěma vřeteny od firmy VHS KRAL. Společnost dodává žlabová stavítka s ručním ovládáním pomocí kuželového soukolí v rozsahu délek hradící desky 1400 až 2800 mm. V případě ovládání stavítka servomotorem, může být použito jako regulační člen průtoku.

Nejdůležitějším rozměrem celé soustavy přepadového stavítka je výška přepadových desek, která bude vypočítaná pro navržený přepadový průtok  $Q_{Př} = 0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Výška bude vypočítaná metodou rovnoměrného proudění v kanálech podle Ganquillet – Kuttera, kdy správnou výšku desek určíme stejně jako v kapitole 2.2.3, když si ze vzorce (2.2) pro průtok vyjádříme hledanou výšku přepadové desky  $h_{Př}$  a pomocí 20. iterací zjistíme její správnou hodnotu pro  $Q_{Př} = 0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , tedy:

$$\sum_{i=1}^{20} h_{Př1} = \frac{Q_{Př}}{C_{G-Ki} \cdot \sqrt{\frac{b \cdot h_{Př0}}{2 \cdot h_{Př0} + b}} \cdot i_0 \cdot b} = \frac{0,2}{30,05 \cdot \sqrt{\frac{1,4 \cdot 0,126}{2 \cdot 0,126 + 1,4}} \cdot 0,002 \cdot 1,4} \quad (4.2)$$

$$h_{Př1} = 0,3253 \text{ m}$$

$$\sum_{i=0}^{19} C_{G-Ki} = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0,00155}{i_0}}{1 + \left(23 + \frac{0,00155}{i_0}\right) \cdot \frac{n}{\sqrt{\frac{b \cdot h_{Př0}}{2 \cdot h_{Př0} + b}}}} = \frac{23 + \frac{1}{0,02} + \frac{0,00155}{0,002}}{1 + \left(23 + \frac{0,00155}{0,002}\right) \cdot \frac{0,02}{\sqrt{\frac{1,4 \cdot 0,126}{2 \cdot 0,126 + 1,4}}}} \quad (4.3)$$

, kde:  $Q_{Př} = 0,20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

$$C_{G-K0} = 30,05$$

$$b = 1,4 \text{ m}$$

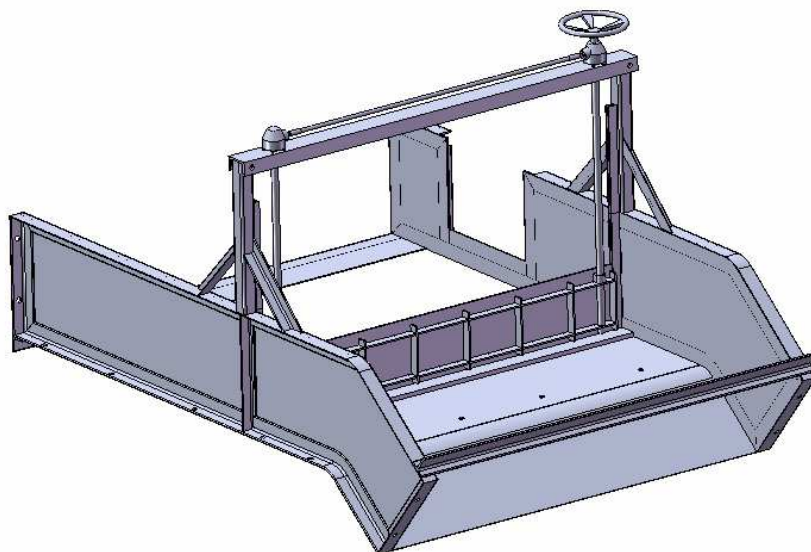
$$n = 0,02 \text{ pro starý beton, podle [4]}$$

$$i_0 = 0,2\% = 0,002$$

$$h_{Př0} = 0,126 \text{ m}$$

Po zkonvergování výpočtu je správná výška přepadové desky  $h_{Př} = 0,226 \text{ m}$ , výsledky jednotlivých iteračních kroků obsahuje příloha 2.

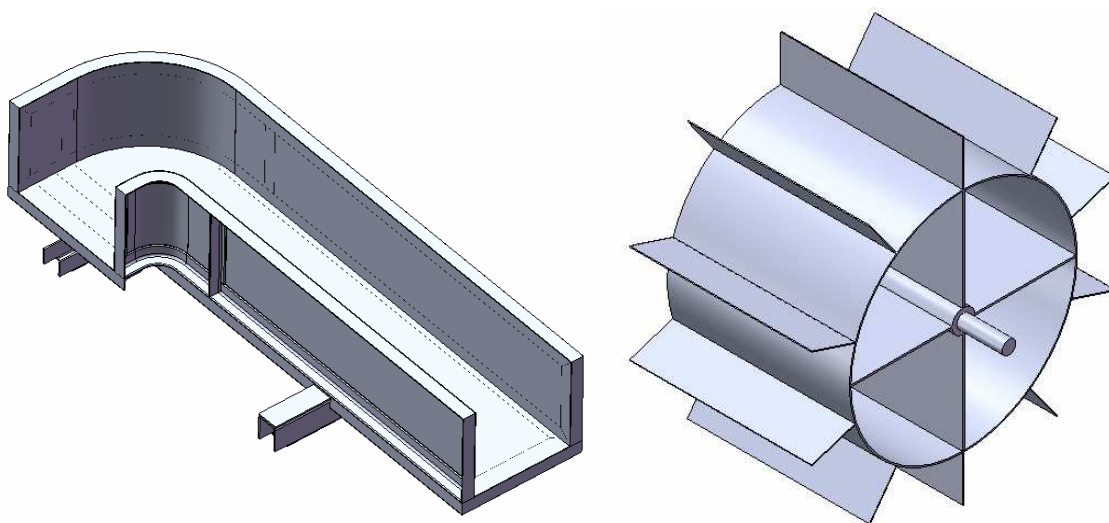




Obr.21 Uložení stavítka v přívodu

#### 4.4 PŘÍVOD K VODNÍMU KOLU A VODNÍ KOLO

Jak již bylo řečeno zvláštním požadavkem zadavatele je, aby v blízkosti MVE bylo umístěné vodní kolo, jako odkaz na využití vody na tomto místě v minulosti. Voda pro toto kolo bude odebírána z přívodu otvorem o velikosti 400 x 293 mm a to pomocí malého ručně ovládaného stavítka, které je podrobně popsáno níže. Toto stavítko bude pevně uloženo mezi rámem přívodu a rámem přívodu k vodnímu kolu. Přívod k vodnímu kolu není komplikovaně řešen, je pouze navržen tak, aby svým tvarem přivedl vodu od výstupního otvoru k vodnímu kolu. V krajní situaci by mohl sloužit jako menší přepad pro odvod nadbytečného množství vody. Skládá se opět z rámu svařeného z normalizovaných profilů nerezové oceli ČSN 17 240 jak ukazuje obr.22, ve kterém jsou napevno připevněny plechy o tloušťce 2 mm a celý je uložen na horní ploše nádrže. Jeho maximální rozměry jsou 1740 x 394 x 638 a hmotnost 76 kg.



Obr.22 Přívod k vodnímu kolu a vodní kolo

Vodní kolo obr.22 má za úkol vizuálně zvýraznit tekoucí proud vody přes své lopatky, kterých má po svém obvodu 10 a mají tvar obdélníka o tloušťce 2 mm je vyrobeno z chromniklové nerezové oceli ČSN 17 240. V jeho vnitřním prostoru jsou čtyři výztužné desky o tloušťce 4 mm, na kterých je uchycen náboj kola o průměru 30 mm, přibližná hmotnost je 25 kg. V místnosti bude uloženo pomocí konzoly umístěné na rámu nádrže a pomocí náboje připevněného ke stěně místnosti. Způsob uložení je podrobně popsán v kapitole montážního postupu. Poloha osy vodního kola byla umístěna pod konec přívodu, aby bylo zajištěno, že v případě malého průtoku se vodní kolo bude točit. Dále byl vhodně zvolen průměr kola a to v závislosti na dopadajícím paprsku vody, jehož poloha dopadu se vypočítá z teorie šikmého vrhu (dopadu) následovně:

a) nejdříve byla určena pomocí metody obdélníkového přepadu velikost průtoku v přívodu k vodnímu kolu  $Q_{Pk}$ , kdy je uvažována výška hladiny  $h_{Př}$  v přívodu do nádrže, tedy výšce, kdy je dosažen přepadový průtok  $Q_{Př}$ , jak bylo uvedeno v kapitole 4.3 rovnice (4.2) :

$$Q_{Pk} = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot b_p \cdot \sqrt{2g} \cdot h_p^{\frac{3}{2}} = \frac{2}{3} \cdot 0,65 \cdot 0,4 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81} \cdot 0,126^{\frac{3}{2}} \quad (4.4)$$

, kde:  $\mu = 0,65$

$b_p = 0,4 \text{ m}$

$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

$h_p = 0,126 \text{ m}$  (výška hladiny v přívodu do nádrže při  $Q_{Př}$  odečtená od výška vstupního otvoru přívodu k vodnímu kolu)

$$Q_{Pk} = 0,0343 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

b) dále byla vypočtena rychlost  $v_{Pk}$  v přívodu k vodnímu kolu:

$$v_{Pk} = \frac{Q_{Pk}}{S_{Pk}} = \frac{Q_{Pk}}{b_p \cdot h_p} = \frac{0,0343}{0,4 \cdot 0,126} \quad (4.5)$$

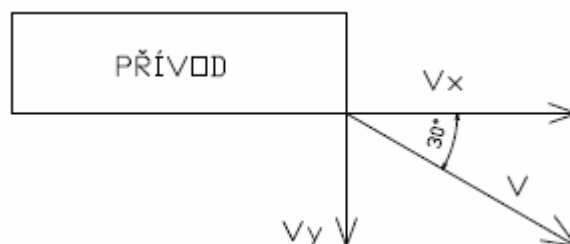
$$v_{Pk} = 0,68 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

c) tato rychlost bude považována po výstupu z přívodu za rychlost dopadající kapaliny ve směru x, jak ukazuje obr.23 a dále bude určena velikost rychlosti ve směru y, potom :

$$v_{Pk} = v_x = 0,68 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.6)$$

$$v = \frac{v_x}{\cos 30^\circ} = \frac{0,68}{\cos 30^\circ} = 0,785 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.7)$$

$$v_y = v \cdot \sin 30^\circ = 0,785 \cdot \sin 30^\circ = 0,393 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.8)$$



Obr.23 Schéma rozdělení rychlosti na hraně přívodu k vodnímu kolu



d) pro teorii šikmého vrhu platí rovnice (4.9) a (4.10):

$$x = v_x \cdot t \quad (4.9)$$

$$y = v_y \cdot t + \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 + y_o \quad (4.10)$$

, kde:  $y_o = 0$  m

$y = 0,4$  m (vzdálenost od dna přívodu k patě lopatky vodního kola)

$v_x = 0,68$  m·s<sup>-1</sup>

$v_y = 0,393$  m·s<sup>-1</sup>

, potom:

$$x = 0,68 \cdot t$$

$$0,4 = 0,393 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot 9,81 \cdot t^2 + 0$$

,dále řešíme kvadratickou rovnici:

$$\frac{1}{2} \cdot 9,81 \cdot t^2 + 0,393 \cdot t - 0,4 = 0 \quad (4.11)$$

$$t_{1,2} = \frac{-0,393 \pm \sqrt{0,393^2 - 4 \cdot 4,9 \cdot (-0,4)}}{2 \cdot 4,9}$$

$$t_1 = 0,25 \text{ s}, t_2 = -0,33 \text{ s}$$

e) správný výsledkem je kladný kořen kvadratické rovnice (4.11)  $t_1 = 0,25$  s, po dosazení do rovnice (4.9) je maximální vzdálenost  $x$  dopadu paprsku proudu od hrany přívodu při přepadovém průtoku  $Q_{Pr}$ :

$$x = v_x \cdot t = 0,68 \cdot 0,25$$

$$x = 0,17 \text{ m}$$

Vnější průměr vodního kola musí být minimálně dvojnásobkem hodnoty  $x$ , aby voda při přepadovém průtoku  $Q_{Pr}$  dopadala na lopatky kola, tedy  $D_{min} = 0,34$  m. Volím vnější průměr vodního kola  $D_{VK} = 0,7$  m, pro zajištění otáčení i při větších průtocích než  $Q_{Pr}$ .

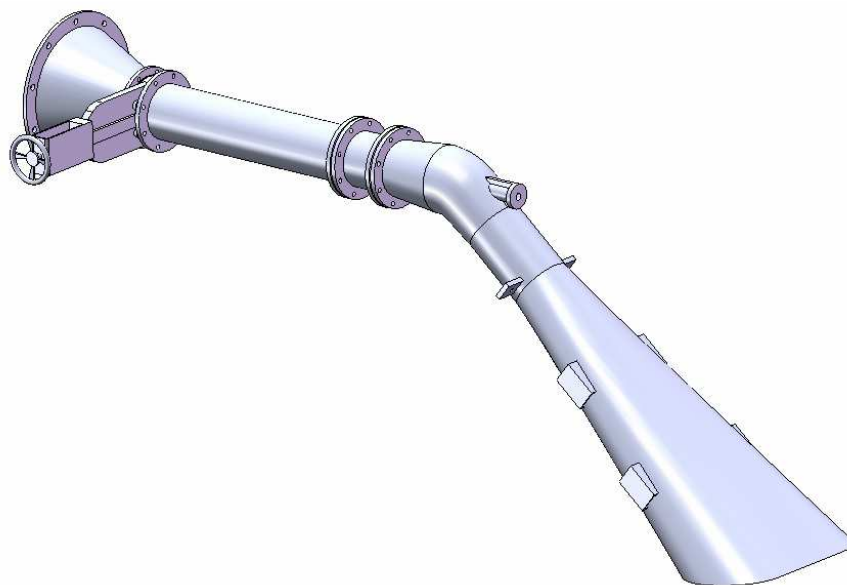
Ručně ovládané stavítko bude sloužit k regulaci průtoku pro přívod na vodní kolo. Toto stavítko je produktem firmy Jihomoravská armaturka, která vyrábí velké množství armatur jako jsou šoupátka, klapky, ventily, filtry apod. Tento typ stavítka obr.24 se běžně používá pro odpadní, komunální a průmyslovou odpadní vodu, pro kaly a vodohospodářské využití při dovolené pracovní teplotě do 50 °C. Většinou se umísťuje do drážky v betonovém žlabu nebo před žlab. V našem případě, ale bude pevně připevněn k rámu přívodu. Skládá se z rámu stavítka, uzavírací desky, matice, vodícího šroubu a ručního kola, všechny tyto díly jsou vyrobeny z nerez oceli X5CrNi 18 10 a těsnění uzavírací desky je z pryže EPDM. Stavítko je oboustranně těsnící, a odolá maximálnímu přetlaku, který odpovídá výšce uzavírací desky. Pro naši potřebu byla zvolena výška i šířka desky 400 mm, potřebný zdvih 300 mm a ovládání stavítka ručním kolem. Přístup ke stavítku bude zajištěn pomocí lávky z perforovaných roštu, její návrh je popsán v kapitole 4.6.



Obr.24 Stavítko

## 4.5 POTRUBÍ A RÁM POTRUBÍ

Po ohybu proudu v nádrži směřuje proud vody do potrubí obr.25, které se skládá z vstupního kužele, šoupátka, trubky, demontovatelné části s turbínou a kolenové savky. Všechny tyto části budou vyrobeny z chromniklové nerezové oceli ČSN 17 240, jejíž vlastnosti už byly popsány dříve. V závislosti na numerickém modelu proudění, podle kterého je největší tlak v systému roven 0,0183 MPa bylo zvoleno, že všechny části potrubí musí být navrženy na nejvyšší dovolený provozní přetlak 0,6 MPa, tedy potrubí s označením PN 6. Dále podle vypočteného průměru turbíny  $D_p = 0,1913$  m byla zvolena jmenovitá světlost potrubí DN 200, v případě např. varianty C by bylo podle  $D_2 = 0,241$  m zvoleno DN 250. Podle těchto hodnot se odvíjí rozměry všech částí sestavy potrubí a také přírub pomocí, kterých budou jednotlivé díly spojeny. Pro DN 200 a PN 6 je vnější průměr příruby 320 mm, délka příruby 22 mm, průměr roztečné kružnice 280 mm, na které bude ležet 8 otvorů o průměru 18 mm pro šrouby M 16. Všechny tyto rozměry jsou podrobně zobrazeny v příloze 7 – sestava potrubí, kde lze i zjistit, že všechny součásti potrubí při montáži projdou vstupním otvorem do místnosti.



Obr.25 Potrubí

Průměr a tvar vstupního kužele do potrubí byl zvolen v návaznosti na výpočet proudění, kdy se tento tvar po vizuálním vyhodnocení osvědčil. Dalším dílem je deskové mezipřírubové šoupátko o jmenovité světlosti DN 200, které bude sloužit jako obousměrná uzavírací armatura v případě odstavení nebo poruchy turbíny. Mezipřírubový typ byl zvolen z důvodu nedostatku místa pod přepadem a výhodné délky z hlediska ovládání ručním kolem. Šoupátko nabízí firma Jihomoravská armaturka, od které již bylo použito stavítko přívodu k vodnímu kolu. Šoupátko je vhodné pro potrubí s neagresivní povrchovou, užitkovou a odpadní vodou. Těleso šoupátka je z tvárné litiny, ucpávkový šroub a vřetenová matice z mosazi, těsnění tělesa, uzavírací desky a ochranné trubky z pryže NBR. V této variantě, jak je ukázáno v příloze 4 – sestava MVE je řešeno šoupátko s ovládání ručním kolem, ale pravděpodobnější bude varianta použití ovládání elektrickým servomotorem, jak ukazuje obr. 26. Při realizaci druhé varianty by šoupátko mělo být napojeno na řídicí systém MVE, který v případě nedostatečného nebo naopak příliš velkého průtoku odstaví turbínu a pak uzavře pomocí šoupátka prostor potrubí. Přímá část potrubí má délku 1 m a jak už bylo řečeno bude tvořena trubicí o jmenovité světlosti DN 200, navržené na maximální provozní přetlak 0,6 MPa.

Demontovatelná část potrubí s turbínou v této práci není podrobně řešena, jen byla vhodně zvolena její umístění pro montáž a také z hydraulického hlediska a to tak, aby byl proud přicházející na turbínu co nejrovnoměrnější, jak uvádí kapitola 5.4.2.



Obr.26 Deskové šoupátko ovládané ručním kolem nebo el. servomotorem

Poslední částí potrubí je kolenová savka. Jejímž hlavním úkolem, jak uvádí [5] je snižovat výstupní ztrátu z oběžného kola a to tak, že využívá výtokové rychlosti z oběžného kola. Tento význam savky ještě více roste u rychloběžných turbín a u použité Vírové turbíny je zvláště důležitý, protože voda opouští oběžné kolo s velkou rychlostí. Protože správný hydraulický návrh savky je mimo cíle této práce byla savka navržena jen podle určitých předpokladů, kdy jejich negativa by se měly projevit při vizuálním hodnocení proudění v kapitole 5.4.3. Při realizaci projektu by měl být její detailní hydraulický profil navržen spolu s oběžným kolem turbíny. Použité předpoklady návrhu sací trouby, podle [5]:

a) zvolit správný vrcholový úhel savky v rozmezí  $8^\circ$  až  $13^\circ$ , což je vyjádřeno vzorcem (4.12):

$$\frac{\sqrt{S_4} - \sqrt{S_3}}{L} = 0,2 \text{ až } 0,125 \quad (4.12)$$

, kde:  $S_4$  – plocha koncového průřezu savky  
 $S_3$  – plocha počátečního průřezu savky  
 $L$  – jejich vzdálenost (délka sací trouby)

Po dosazení hodnot z použitého návrhu, kdy:  $S_4 = 0,2897 \text{ m}^2$ ,  $S_3 = 0,0314 \text{ m}^2$ ,  $L = 2,3346 \text{ m}$  nabývá rovnice (4.12) hodnot:

$$\frac{\sqrt{0,2847} - \sqrt{0,0314}}{2,3346} = 0,153$$

vyhovuje

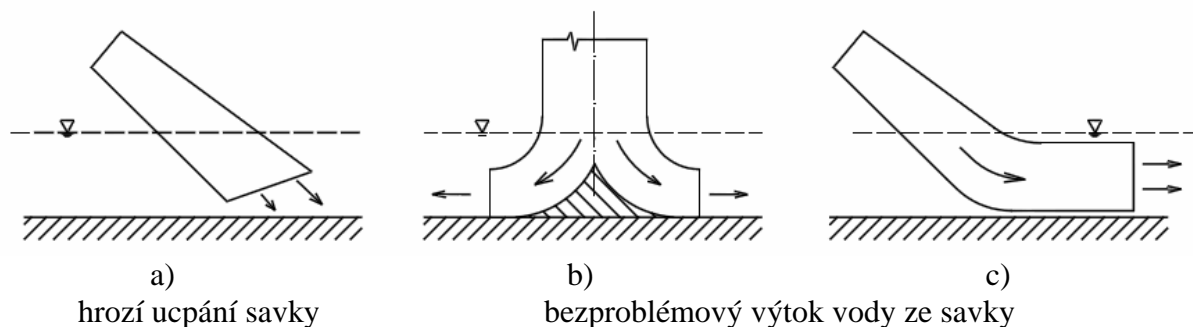
b) zvolit výstupní průřez  $S_4$  ze sací trouby tak, aby rychlost  $v_4$ , se kterou opouští voda sací troubu byla v rozsahu  $1 \text{ až } 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Tato hodnota rychlosti byla vyčíslena pomocí výpočtu proudění ve Fluentu. Pak rychlost na výstupu ze savky  $v_4 = 0,574 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

c) dodržet správný kombinační návrh kolenové sací trouby, při kterém dosahuje savka nejvyšší účinnosti a to je kombinace:

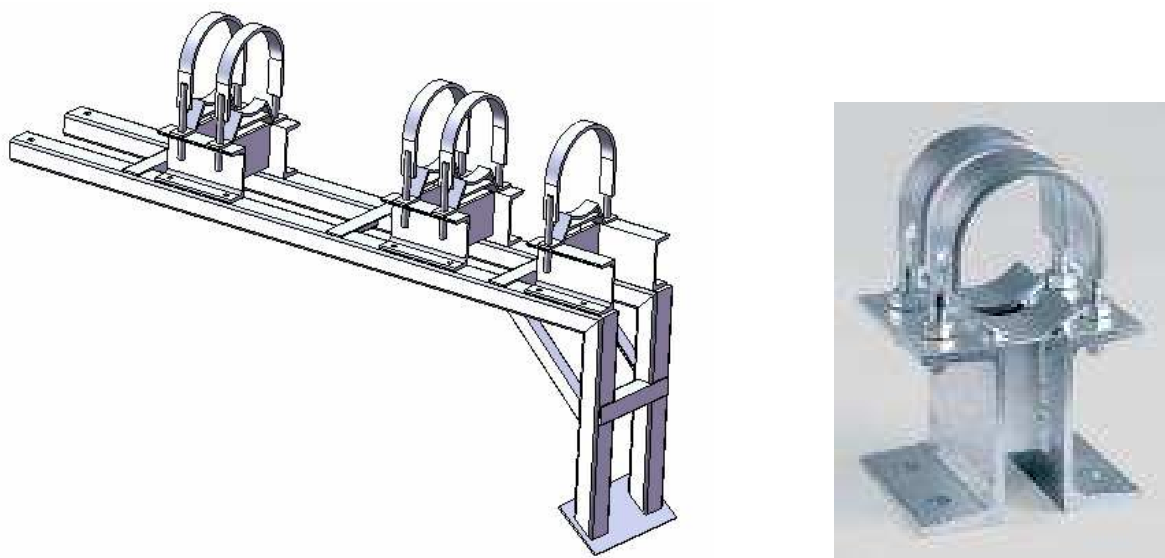
kužel – koleno – přímá trouba – kónus

Výsledky vyhodnocení proudění v savce jsou uvedeny v kapitole 5.4.3. Dále bylo zjištěno, že při takto navrženém tvaru savky by docházelo k postupnému ucpání výstupního průřezu ze savky, jak je vidět na obr.27 a) a tím by se snížil průtok turbínou, přibližně o polovinu a současně i množství dodávané elektrické energie do sítě. Toto snížení průtoku by bylo způsobeno špatně navrženým výstupním prostorem, který by nezvládal odvést požadované množství vody, které by tak zůstávalo v koncovém prostoru savky a ucpávalo ji. Možná řešení problému jsou uvedena na obr.27, kdy v případě b) je využito cylindrovité savky umístěné kolmo ke dnu a v případě c) je savka ohnutá rovnoběžně se dnem.



Obr.27 Řešení špatně navržené savky

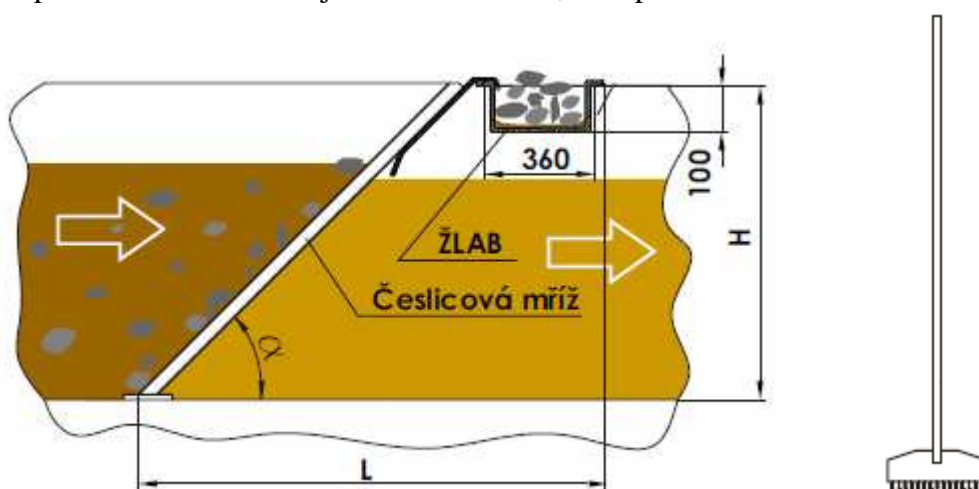
Kromě toho, že jsou k sobě díly potrubí uchyceny pomocí šroubů a přírub musí být i celá soustava potrubí v prostoru uložena pomocí rámu vyrobeného z normalizovaných profilů z chromniklové nerezové oceli ČSN 17 240. Jeho podrobné uchycení je popsáno v montážním postupu. Potrubí je k rámu ukotveno pomocí normalizovaných kotevních stojanů obr.28 se dvěma třmeny. Základ tvoří dvoušroubová objímka vyrobená z nerez oceli, opatřená pryžovou tlumící vložkou nebo bez tlumící vložky a dále přídatný kotvící materiál z nerez, tj. nosníky, konzole, závitové tyče, sestavy pro upevnění objímek k nosníkům a konzolám a dále drobný spojovací materiál, jak uvádí [14].



Obr.28 Rám potrubí a kotevní stojan

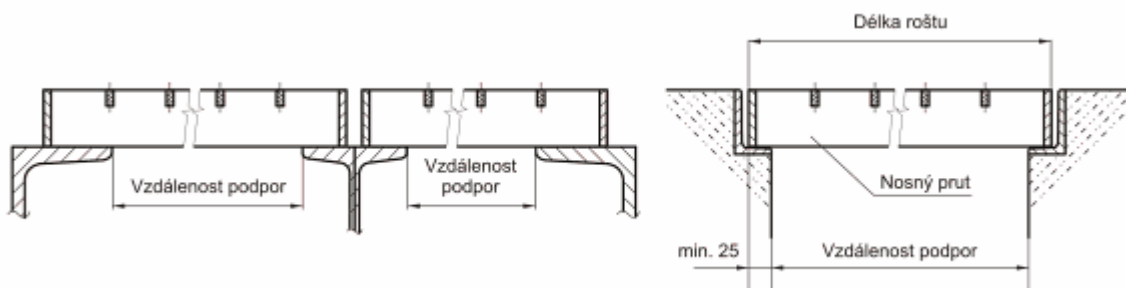
## 4.6 ČESLE, LÁVKY A ŽEBŘÍK

Česle jsou technologické zařízení, které slouží k odstranění hrubých nečistot. V tomto případě byly pro pročištění přírodního kanálu použity ručně stírané česle obr.29 o velikosti průřezu 30 mm, šířce česlic 5 mm a délce 25 mm. Velikostí průřezu jde o střední česle, jsou skloněny pod úhlem  $60^\circ$ , jejich celková výška je 490 mm. Měly by být zabudovány v dostatečné vzdálenosti od budovy a to minimálně 5 m, aby neovlivňovaly rychlostní profil nátoky vody do nádrže. Ztráta, která se na nich vytváří je vypočítána v kapitole 2.3.2 při výpočtu čistého spádu, kdy byl výpočet proveden podle upraveného Berezinského vztahu s uvažováním konstrukčních prvků. Tyto česle vyrábí firma FONTÁNA, která dodává různá zařízení pro čistírny odpadních vod. Při návrhu bylo použito dovoleného rozsahu rozměrů s využitím změny v provedení, kdy bude vyhrnovací žlab umístěn na horní ploše kanálu z důvodů zachování jeho maximální hltnosti. Česle jsou vyráběny z uhlíkaté nebo nerezové oceli, kompletní dodávka obsahuje česlicovou mříž, odkapávací žlab a ruční hráblo.



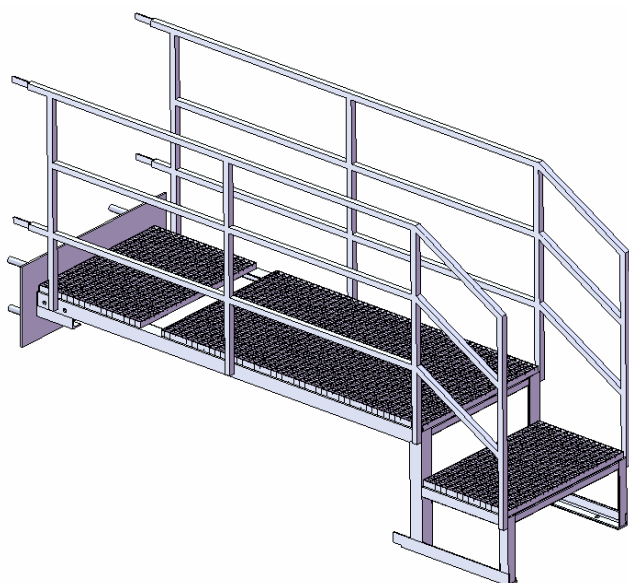
Obr.29 Ručně stírané česle

Aby bylo zajištěno dostupné ovládání přepadového stavítka a stavítka pro přívod ke kolečku musí k ním vést lávka obr.30, která se skládá z normalizovaných profilů z nerezové oceli ČSN 17 240 tvořící hlavní nosnou část lávky. Mezi profily jsou uloženy 4 podlahové rošty o velikosti ok 33,3 x 33,3 mm a nosném profilu 30 x 3 mm. Rošty mají únosnosti při rovnoměrném zatížení  $24,6 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$  a při dovoleném působení osamělé síly ve středu roštu 3,38 kN. Normalizovaná šířka roštu je 800 mm a zvolené délky 1000, 600, 550 a 500 mm, jejich uložení na nosné konstrukci z profilů je zajištěno podle schématu na obr.31.



Obr.31 Uložení roštů na nosné konstrukci

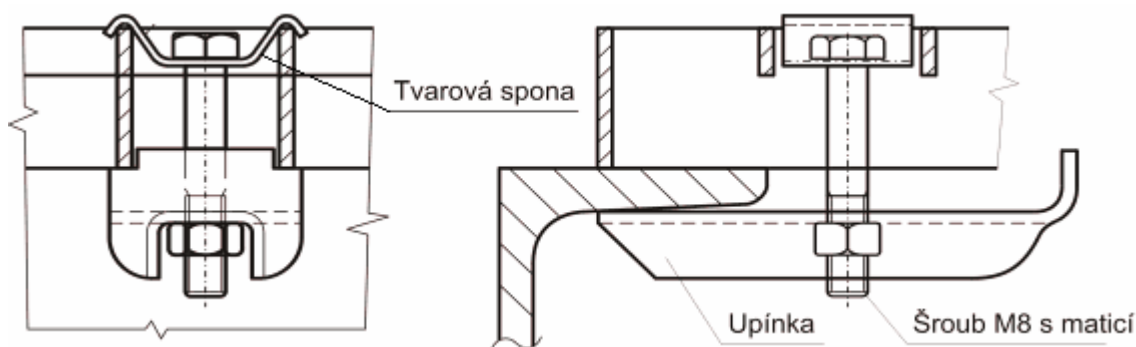




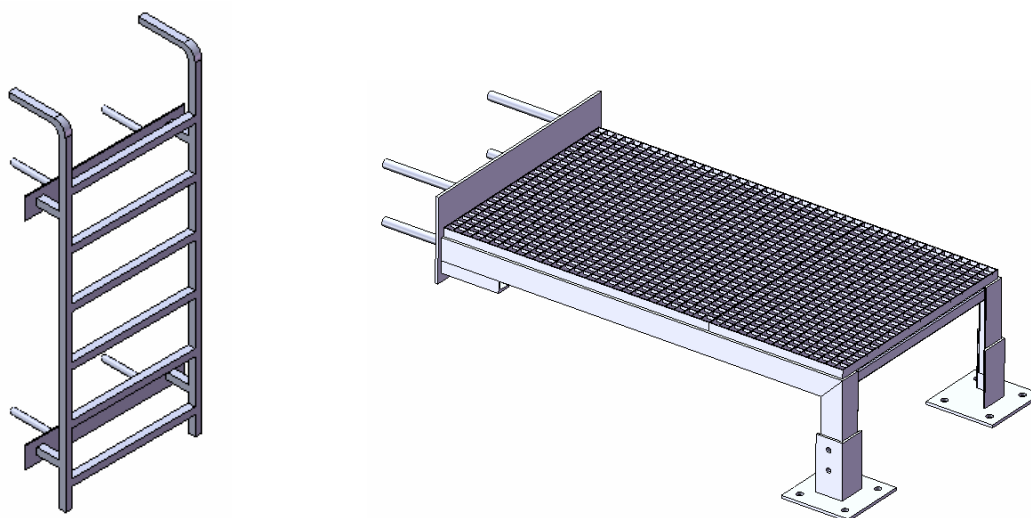
Po uložení roštu na nosný profil budou součásti spojeny pomocí speciální upínky, jak ukazuje obr. 32. Z důvodů zachování bezpečnosti má lávka po obou stranách zábradlí, které má základní normovanou výšku 1 m a je napevno, ale až na místě montáže připevněno k nosné konstrukci. Lávka svými rozměry 820 x 640 x 2785 mm bez zábradlí projde vstupním otvorem.

Pro údržbu a přístupnost MVE bude u stěny umístěn žebřík, na který navazuje menší lávka obr. 33. Lávka bude sloužit k přístupu pro ovládání šoupátka ručním kolem. V případě použití šoupátka ovládaného servomotorem tato lávka použita nebude.

Obr.30 Lávka s podlahovými rošty



Obr.32 Detail uchycení roštu upínkou



Obr.33 Žebřík a lávka pro dostupnost šoupátka

## 4.7 GENERÁTOR

Jako generátor bude použit 4. pólový asynchronní elektromotor o výkonu 2,2 kW s kotvou nakrátko od firmy SIEMENS obr.34, který jakožto stroj bývá často používán u malých MVE právě k tomuto účelu. S turbínovou hřídelí bude spojen pomocí převodovky, protože nebude dosaženo požadovaných nadsynchronních otáček pro optimální průtok, jak je uvedeno v kapitole 3.7. Jejich dosažení je nutné, aby elektromotor fungoval jako generátor. Kdy mu musí být uděleno větších otáček než jsou jeho synchronní otáčky, které jsou v tomto případě  $1500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ . Jako nadsynchronní otáčky bylo v kapitole 3.5 zvolen  $1520 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , kterými tedy bude muset točit oběžné kolo turbíny, aby generátor dodával do sítě elektrický proud. Z důvodu použití v prostředí s relativně velkou vlhkostí, bude elektromotor v provedení pro zvýšenou vlhkost od 60 do  $100 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  vzduchu v závislosti na teplotě. Měl by být také chráněn proti možnému vniknutí vody.



Obr. 34 Trojfázový asynchronní elektromotor

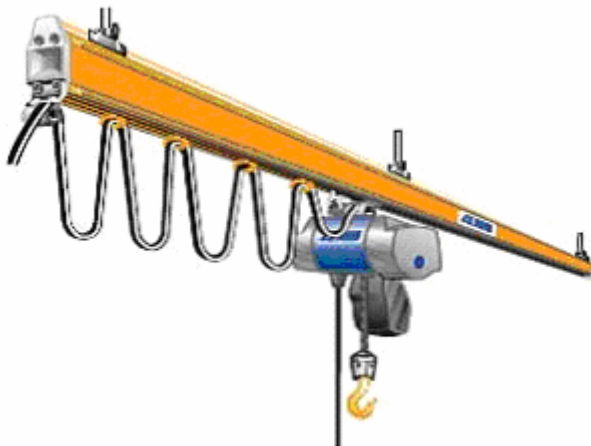
Generátor bude v prostoru umístěn v ose rotace oběžného kola turbíny, jak je dobře vidět v příloze 4 – sestava MVE. Připevněn bude na desce vlastního rámu, který bude uložen na rámu potrubí a z části na savce, tento rám pro generátor je plně demontovatelný.

Funkce spouštění generátoru by měla být následující (celý tento postup by měl být automatizovaný): Z počátku je turbína uzavřená, generátor se připojí k síti a začne pracovat jako elektromotor a dosáhne asynchronních otáček. Potom automatika pozvolna otevře přívod vody do potrubí s turbínou. Turbína začne generátor zrychlovat a až jej roztočí na nadsynchronní otáčky, začne soustrojí dodávat energii do sítě, tím dojde k mechanickému zatížení a soustrojí se na těchto otáčkách ustálí. Zastavování soustrojí bude probíhat obráceným postupem. Platí zde podmínka, že musí být zabráněno připojit generátor omylem k síti, běželi-li turbína naprázdno vysokými otáčkami, jak je uvedeno v [7].

## 4.8 MONTÁŽNÍ POSTUP

V kapitole 4 a přílohách 4 až 7 bylo prokázáno, že všechny součásti potřebné pro sestavení MVE projdou montážním otvorem o rozměrech  $1,4 \times 3,66 \text{ m}$ . Tímto otvorem by měly být instalovány větší díly MVE, součásti lehčí a menší, jako je např. díly potrubí by měli projít zárubněmi dveří o rozměrech  $1 \times 2,2 \text{ m}$ . K přemístění dílů do místnosti určené pro instalaci MVE bude sloužit jednokolejnicový podvěsný jeřáb s elektrickým pojezdem obr. 35 o maximální nosnosti 1200 kg, zvolené podle sestavení nádrže, jejíž celková hmotnost je určena v kapitole 4.1.

Bude u místěn u stropu místnosti v ose vstupního otvoru a s výhodou lze tento jeřáb nechat v místnosti trvale, aby bylo možno lépe manipulovat s díly MVE při poruchách a kontrolách. Tento typ není pro montáž směrodatný, lze použít i jiné typy montážních prostředků, jako je např. ruční kladka.



Obr.35 Jednokolejnicový jeřáb

Po vybudování potřebných stavebních uprav uvedených v kapitole 6, by měl být montážní postup následující:

- a) v místnosti se nejdříve smontují obě poloviny nádrže k sobě pomocí šroubů umístěných po obvodu jejich společné dosedací plochy. Požadovaná těsnost tohoto spoje je řešena pomocí gumového těsnění.
- b) usadí se smontovaná nádrž na čtyři patky a zajistí se ve správné poloze vzhledem ke dnu venkovního kanálu. Současně by mělo být správně uloženo dno nádrže, které nesmí ležet na dnu místnosti, a proto jsou k spodní části rámu přivařeny dva nosníky, které tuto polohu zajistí. Jejich konečná poloha by měla být dorovnána vkládacími elementy mezi nosníkem a plochou dna. Pro konečné uložení nádrže se vyvrtají otvory skrz patky a nohy rámu nádrže a zajistí se třemi šrouby na každé patce. Posuvné patky a nosníky dna jsou ke dnu místnosti zajištěny čtyřmi šrouby po obvodu dosedacích ploch. Tyto šrouby budou pevně uloženy v betonových základech dna místnosti, při montáži se na šrouby nasunou patky a pevně zajistí maticí. Nakonec se zabetonují do stěn místnosti profily, které zabraňují převrácení nádrže.
- c) uloží se přívod na nádrž, kdy mezi těmito dvěma díly musí být gumové těsnění. Pevné spojení dílů zajistí šrouby umístěné po stranách rámu a uvnitř přívodu, jejich přesné polohy jsou vyznačeny v příloze 6. Současně musí být přívod uložen na šrouby na stěnové desce tvořící oplechování stěn konce kanálu, kdy těsnost spoje je opět zajištěna těsněním. Uložení musí být takové, aby byl vytvořen plynulý přechod proudu vody z venkovního kanálu do nerezového přívodu.
- d) na připravené stěnové desky se namontuje velký nosník pro uložení přepadu.
- e) na tento nosník se do přesné vymezené polohy připevní pomocí šroubů rám potrubí a zároveň se na druhé straně přichytí k rámu nádrže.
- f) na rám potrubí se uloží dva kotevní stojany zajišťující polohu přímé části potrubí, v této části montáže by stojany neměly být uloženy pevně, protože není přesně vymezena poloha jednotlivých dílů potrubí.
- g) smontují se dohromady díly potrubí, kdy se nejdříve k čelní stěně nádrže pomocí příruby a šroubů připevní vstupní kužel, dále se na kotevní stojany uloží přímá část potrubí a mezi ně se uloží mezipřírubové šoupátko. Upínkou na kotevním stojanu se zajistí pevná poloha přímé části potrubí, potom se uloží savka ke dnu místnosti pomocí připravených patek a také se



uloží na kotevní stojan a zajistí objímkou. V poslední fázi montáže potrubí se vloží část s turbínou.

h) pomocí šroubů se provede montáž přepadu. To znamená uchytit přepad na velký nosník, ke skloněné části přívodu ( u tohoto spoje bude pryžové těsnění) a k rámu nádrže.

i) ukotví se savka k přepadu a to pomocí demontovatelných profilů.

j) k rámu potrubí a ke kotevním prvkům savky se připevní rám generátoru, na který se uloží generátor a spojí se pomocí převodovky s turbínovou hřídelí. V příloze 4 - sestava MVE je toto spojení řešeno pomocí spojky.

k) na rám přívodu k nádrži se připevní malé stavítko, ale bez ručního kola, které by neprošlo otvorem v lávce, to se uloží až po montáži lávky. Na stavítko následně dosedne čelní plocha přívodu k vodnímu kolu. Ten bude připevněn jednak k rámu nádrže a také k rámu přívodu. Případně je i možná montáž pomocí šroubů skrz rám přívodu a stavítka.

l) pod hranu přívodu k vodnímu kolu se uloží vodní kolo tak, aby osa tohoto kola ležela pod touto hranou. Tím bude zajištěno otáčení kola i při malém průtoku. Kolo je na jedné straně uloženo pomocí stěnové desky a na druhé konzolou kolečka upevněné pevně k rámu nádrže. Plynulé otáčení vodního kola v nábojích bude zajištěno pomocí teflonového ložiska.

m) v další fázi montáže by na lávku mělo být připevněné zábradlí a pak celá tato lávka uložena pomocí šroubů na stěnovou desku na jedné straně. Na druhé straně se lávka uloží na rám nádrže nebo v případě odlehčení rámu na stěnu schodů, to ale v této práci není řešeno.

n) po montáži lávky se pevně uloží do přívodu přepadové stavítko a zajistí se správné vedení přepadových desek.

o) jak už bylo určeno, v dostatečné vzdálenosti (přibližně 5 m) od nátoky do nádrže by měli být umístěny ručně stírané česle, které budou uloženy na horní ploše venkovního kanálu pomocí dvou I profilů ukotvených do této horní stěny kanálu.

p) dále by měla být provedena montáž odkalovacích dvířek, které se otáčí pomocí čepu vedoucího skrz pant a závěs uložených na rámu nádrže. Při otevírání budou odkalovací dvířka zajištěna v horní poloze pomocí dvou závěsů na horní stěně dvířek, proti kterým jsou umístěna záchytná oka pro snadné zachycení v otevřené poloze. Nakonec by mělo být provedeno vyvrtání otvorů pro šrouby, které budou držet dvířka v zavřeném poloze. V zavřeném stavu by měla být zajištěna proti unikání vody, proto by mělo být na dosedací ploše dvířek těsnění.

q) na stěnovou desku pod schody se šrouby připevní menší lávka, která je na druhé straně uložena pomocí posuvných patek ke dnu místnosti a to stejným způsobem jako u nádrže.

r) na pevně zabudovanou stěnovou desku se připevní žebřík určený pro zajištění přístupnosti dolního prostoru MVE.

s) do připravené příruby v nádrži se umístí hydrostatický snímač hladiny.

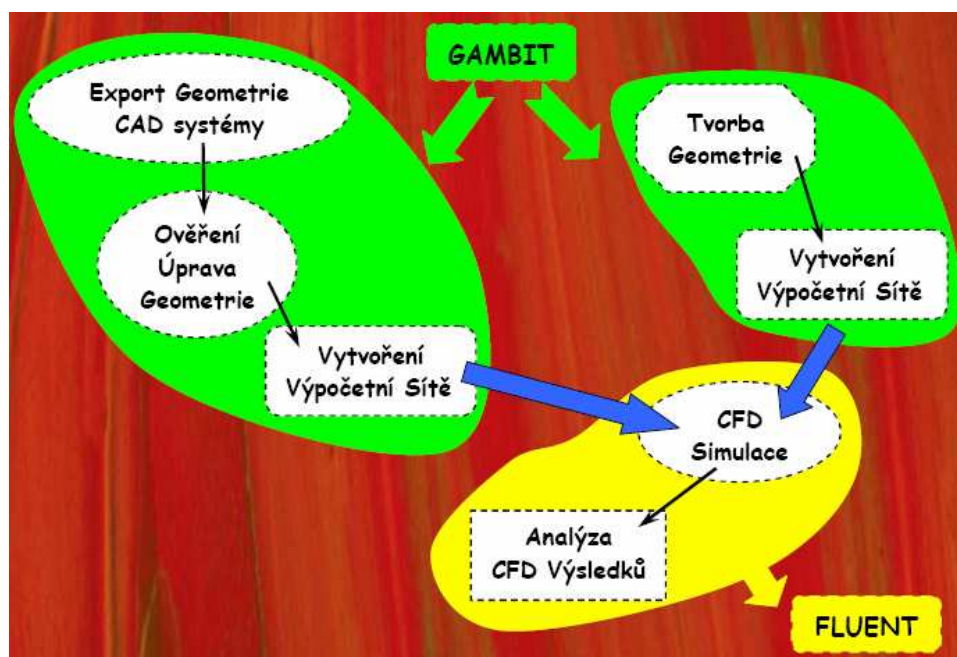
Všechny šrouby, které budou použity při montáži by měli být ze stejného materiálu jako díly MVE, tedy chromniklové nerezové oceli ČSN 17 240, aby bylo zajištěno, že nebude docházet k bimetalické korozi, vlivem kontaktu různých materiálů.

Problém automatického provozu MVE by měl být řešen odborníky tohoto oboru, ale budou zde uvedeny hlavní požadavky, kterým by tento automatický systém měl vyhovovat:

- nízké pořizovací náklady
- pomocí snímačů hladiny v nádrži ve vhodný okamžik odstavit celý systém nebo ho spustit
- řídit rozběh a brzdění turbíny a současně i generátoru, jak bylo uvedeno v kapitole 4.7, v návaznosti na tento děj ovládat uzavírací člen potrubí, tedy šoupátko řízené servomotorem.
- vhodně regulovat průtok a to jednak pomocí stavidla umístěného na vstupu vody z řeky do přívodního kanálu a také pomocí el. ovládaného přepadového stavítka
- informovat o aktuální stavu provozu a množství dodávané el. energie např. pomocí textových zpráv posílaných na mobil majitele MVE

## 5 MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ V PŘIVADĚČI

První důležitou podmínkou, kterou by jsme měli znát při návrhu přivaděče na turbínu je charakter proudění, které v tomto přivaděči probíhá. Známe-li průběh tohoto děje, můžeme potom určit nejvhodnější umístění vstupního otvoru do nádrže, jeho velikost a správnou polohu přepadových desek, které hradí průtok do nádrže. Ze správného modelu proudění lze usuzovat také na vhodný tvar nádrže, rozložení středních tlaků po nádrži a rovněž lze zjistit všechny parametrů související s prouděním v nádrži jako je velikost rychlosti, tlaku, turbulence apod. Jako vhodný nástroj pro výpočet modelu proudění v přivaděči nám poslouží software Fluent. Struktura výpočtu modelu proudění pomocí numerické simulace ( CFD - Computational Fluid Dynamics ) metodou konečných objemů pomocí Fluentu je na obr.36.



Obr.36 Postup numerické simulace proudění, převzato z [15]

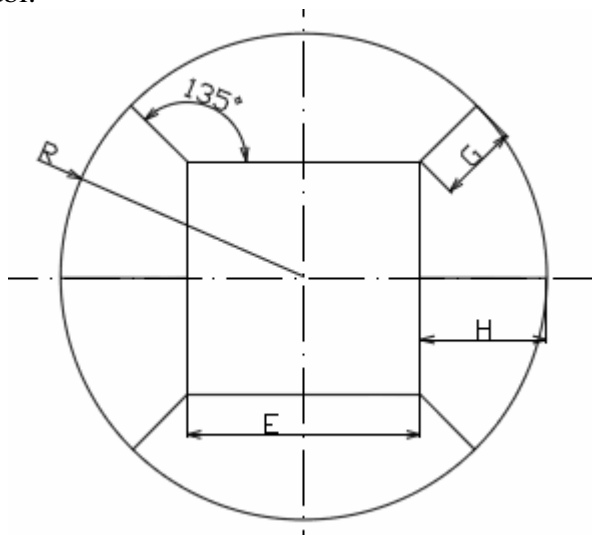
### 5.1 TVORBA VÝPOČETNÍCH OBJEMŮ A SÍTĚ

Dříve než začneme s výpočtem ve Fluentu je nutné správně popsat geometrii a vytvořit diskrétní nepřekrývající se elementy o konečných objemech navrženého přivaděče. K tvorbě této 3D geometrie a výpočetní sítě tvořené konečnými objemy použijeme komerční software Gambit a Solid Works. V prvním kroku si vytvoříme v programu Solid Works, z již dříve navržených jednotlivých částí MVE, objem kapaliny, pro kterou se bude celý výpočet proudění řešit. Tento objem představuje vodu, která by nám při ucpání všech otvorů zaplnila přívod do výšky hladiny, odpovídající námi určenému optimálnímu průtoku. Dále pak celý objem nádrže, objem potrubí a kolenové savky. Takto vytvořený objem je připravený pro další úpravy a práci v Gambitu.

Po importování vytvořeného objemu do Gambitu se bude tento objem dále upravovat a to tak, aby bylo možné vytvořit vhodné dílčí objemy. Ty musí být vytvořeny tak, aby nijak neovlivňovali původní základní objem a zároveň bylo možno vytvořit diskrétní elementy o přijatelné kvalitě sítě. Řešený objem byl rozložen a následně v něm bylo vytvořeno 56 dílčích

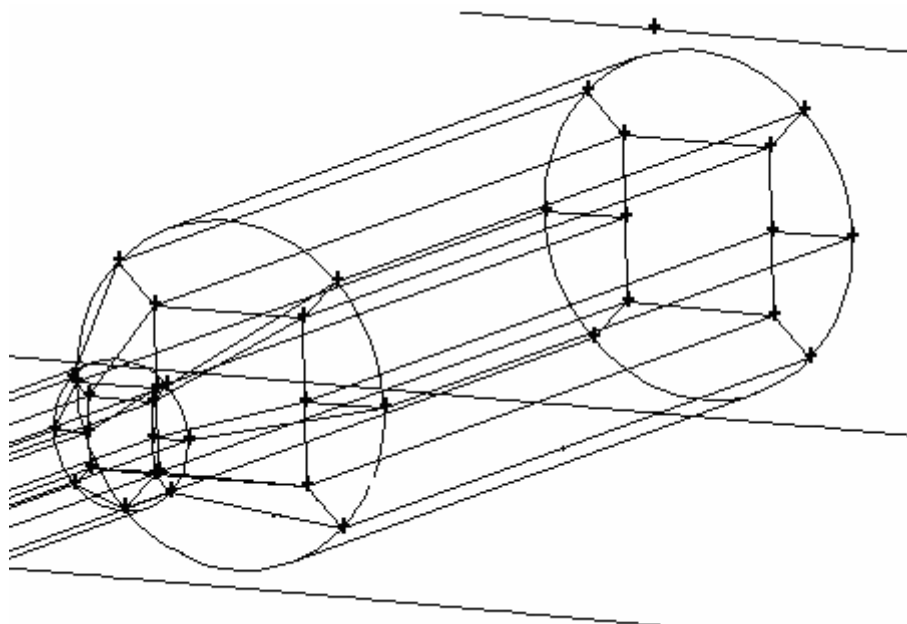
objemů, které při složení svým tvarem kopírují původní základní objem. Tyto jednotlivé dílčí objemy byly vytvářeny podle následujícího postupu:

a) jako výchozí objem byl vybrán objem potrubí. Tento objem se rozloží na 7 mapovaných podoblastí a to z důvodů lepší kvality sítě a následnou rychlejší konvergenci výpočtu proudění. Celé schéma mapovaných podoblastí je na obr.37, kde vnitřní čtverec má délku hrany  $E = 0,96 R$  ( $R$ - vnitřní poloměr potrubí), strana  $G$  je skloněna pod úhlem  $135^\circ$ , strana  $H$  leží v ose průřezu potrubí.



Obr.37 Rozložení potrubí na mapované podoblasti

b) ve válcových objemech, které navazují na mapované podoblasti musí být vytvořené podobné podoblasti se stranou čtverce  $E = 0,96 R$  ( $R$  - příslušný poloměr válcového objemu), dále pak opět strany  $G$  a  $H$ . V důsledku návaznosti jednotlivých buněk budoucí mapované sítě byl stejným způsobem vytvořen i válcový objem v nádrži, jak je vidět na obr.38.



Obr.38 Válcový objem v nádrži rozdělený na mapovanou síť

c) na jednotlivé dílčí podoblasti válcového objemu se pak napojí hrany a strany objemu nádrže. Vznikne tak celkem 56 dílčích objemů, které svým tvarem zaručují lepší kvalitu sítě a tedy i rychlejší konvergenci řešení proudění. Dochází tak k eliminaci vnášených nepřesností, která by mohla vzniknout vlivem horší kvality sítě.

Do takto připravených objemů vytvoříme síť, kdy opět začínáme od námi zvoleného výchozího objemu potrubí. Dále pak na něho navazující další válcové objemy a to až po objemy tvaru kvádrů, které nám tvoří celkový objem nádrže. Ve výchozím objemu potrubí bude rozložení sítě takové, že strana E má 24 dílků a strany G a H mají 16 dílků. Z důvodů správného modelování turbulence v blízkosti stěny byla na všech stěnách s okrajovou podmínkou wall vytvořena mezní vrstva o parametrech uvedených v tab.4.

	Velikost první vrstvy od stěny	Růstový faktor	Počet řad buněk
stěny potrubí	1,2	1,3	4
čelní a zadní stěny nádrže	1,2	1,4	6
boční a horní stěny nádrže	1,2	1,6	6
stěny přívodu	1,2	1,4	6
stěna dna nádrže	1,6	1,5	6

Tab.4 Parametry mezní vrstvy pro jednotlivé stěny

Pro vytvoření povrchové sítě bylo použito předdefinované schéma tvorby sítě MAP pro čtyřúhelníkové prvky, následně bylo provedeno objemové vysítování pomocí schémata HEX/WEDGE - COOPER, které vytvoří šestistěnné prvky. Tímto způsobem byly objemově vysítovány všechny válcové objemy. Ostatní objemy byly opět nejdříve vysítovány plošně, ale pomocí schématu tvorby sítě PAVE, které nám vytvoří čtyřúhelníkovou nestrukturovanou síť, poté bylo opět provedeno objemové vysítování pomocí schémata HEX/WEDGE - COOPER. Takto vzniklá síť má celkem 1 760 176 prvků, které mají podle hodnotícího kritéria kvality sítě EquiSize Skew  $Q_{EVS}$  nejhorší hodnotu prvku 0,72, což je podle tab.5 dostatečná hodnota kvality sítě. Toto kritérium vyjadřuje měřítko velikosti elementů ( prvků ) a je definováno následovně:

$$Q_{EVS} = \left( \frac{S_{eq} - S_e}{S_{eq}} \right) \quad (5.1)$$

, kde:  $S_e$  - objem elementu u 3 D

$S_{eq}$  - maximální objem, odpovídajícího rovnostranného prvku, který má stejnou opsanou kouli jako původní prvek, jak je uvedeno v [16]

$Q_{EVS}$	Kvalita
0	výborná
(0;0,25)	velmi dobrá
(0,25;0,5)	dobrá
(0,5;0,75)	dostatečná
(0,75;0,9)	špatná

Tab.5 Vztah mezi kvalitou sítě a hodnotou  $Q_{EVS}$ , převzato z [16]

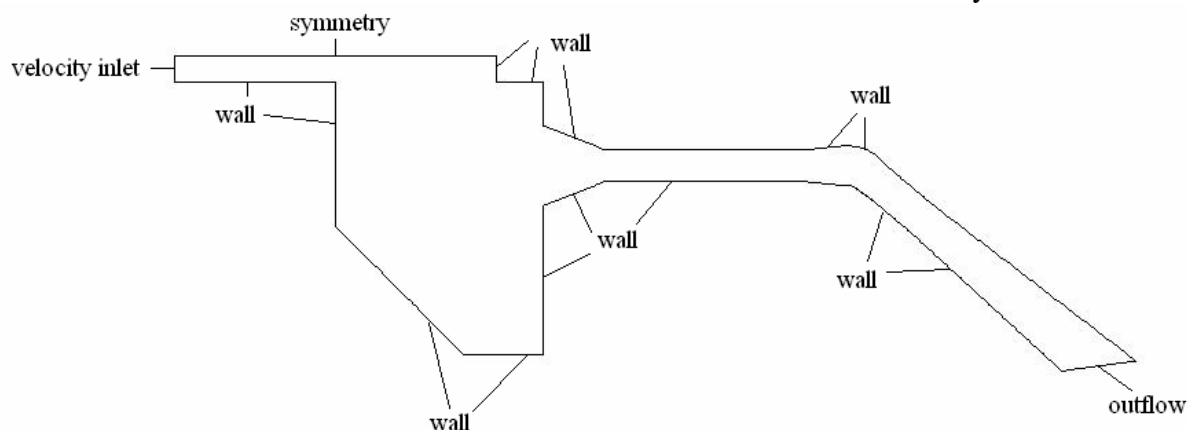
### 5.1.1 DEFINOVÁNÍ OKRAJOVÝCH PODMÍNEK

Na řešení objemu byly předepsány následující okrajové podmínky obr.39 :

- vstup (vstupní plocha přivaděče) - velocity inlet - je definován vektor rychlosti ve směru kolmém na vstupní plochu a jeho velikost
- Na vstupu byl zadán vyvinutý laminární rychlostní profil s velikostí rychlosti  $v_L = 0,519 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
- výstup (výstupní plocha sací trouby) - outflow - derivace rychlosti a tlaku je ve směru normály výstupní plochy rovna nule

Následující rozdělení ploch nádrže je z důvodů zjištění příslušného tlaku působícího na danou plochu.

- stěna přívodu - wall - stěna s platnou podmínkou ulpívání
- horní stěna nádrže - wall
- čelní horní stěna nádrže - wall
- čelní dolní stěna nádrže - wall
- zadní horní stěna nádrže - wall
- zadní dolní stěna nádrže - wall
- pravá horní stěna nádrže - wall
- pravá dolní stěna nádrže - wall
- levá horní stěna nádrže - wall
- levá dolní stěna nádrže - wall
- stěna dna - wall
- stěna kužele potrubí - wall
- stěna přímé části potrubí - wall
- stěna kužele savky (plocha kužele před vstupem do kolena savky) - wall
- stěna kolena savky - wall
- stěna přímé části savky (plochy tvořící přímou část savky za kolenem) - wall
- stěna konce savky ( vlastní plocha konce savky) - wall
- hladina (plocha tvořící hladinu vody v přívodu) - symmetry - nulová normálová rychlost a nulové normálové gradienty všech hledaných veličin



Obr.39 Definované okrajové podmínky

Dále pak definujeme oblast proudění kapaliny pomocí podmínky FLUID, v našem případě se jedná o všechny objemy.

## 5.2 VÝPOČET PLNĚ VYVINUTÉHO LAMINÁRNÍHO PROFILU V PŘÍVODU

Dříve než bude řešeno proudění v přívaděči na turbínu, musí být vyřešen profil plně vyvinutého laminárního proudění v přívodu, který se bude zadávat na vstupu do výpočetní oblasti řešeného problému. Výpočetní modelový přívaděč by měl mít stejné rozměry průřezu jako má přívaděč v řešené úloze a dále by měl být dostatečně dlouhý, aby bylo možno s jistotou určit místo plně vyvinutého laminárního profilu. Toto místo bude určeno pomocí Coriolisova čísla, které vyjadřuje poměr skutečné kinetické energie proudu ku kinetické energii vyjádřené ze střední průřezové rychlosti, tedy:

$$\alpha = \frac{\int_S v_{LX} \cdot v_{LM}^2 dS}{S \cdot v_s^3} = \int_S \frac{v_{LX}}{v_s} \cdot \frac{v_{LM}^2}{v_s^2} \cdot \frac{dS}{S} = \frac{v_{LX} \cdot v_{LM}^2 \cdot S}{v_s^3 \cdot S} \quad (5.2)$$

, kde:  $v_{LX}$  – velikost rychlosti ve směru souřadnice x  
 $v_{LM}$  – absolutní velikost rychlosti v daném průřezu  
 $v_s$  – střední velikost rychlosti, určená z průtoku  
 $S$  – plocha průřezu kapaliny v přívodu

Vzdálenost místa, kde je již plně vyvinutý laminární profil učíme tak, že budeme sledovat hodnotu Coriolisova čísla a až se tato hodnota ustálí s požadovanou přesností, lze označit toto místo za oblast s plně vyvinutým laminárním profilem. Hodnocení přesnosti provedeme podle derivace Coriolisova čísla, kdy dostatečnou přesnost považujeme v okamžiku, kdy hodnota derivace dvou po sobě následujících hodnot je menší jak 0,0001.

Při výpočtu numerického modelu proudění pomocí Fluentu bylo nastavení programu stejné jako při řešení úlohy výpočtu proudění v přívaděči na turbínu, toto nastavení je uvedeno níže v kapitole 5.3, proto již zde nebude podrobně popisováno, akorát v okrajové podmínce VSTUP byla zadána počáteční rychlost  $v_1 = 0,523 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  vypočítaná jako poměr optimálního průtoku a průřezu přívodu. Po zkonvergování úlohy bylo vyhodnocení vyvinutí profilu provedeno pomocí příkazu DEFINE - CUSTOM FIELD FUNCTIONS. Kdy byl naprogramován číselník Coriolisova čísla a následně byly hodnoty tohoto číselníku viz. tab. 6 vypočteny pro různé řezy po délce přívaděče podél osy x a to nejdříve po 0,5 m a následně pro bližší určení správného řezu po 0,1 m. Řezy by neměly být prováděny v oblastech kde, hodnoty bezrozměrné tloušťky mezní vrstvy  $y^+$  neleží v rozsahu 30 až 120, v našem případě v celé oblasti řešení se hodnota pohybuje v rozsahu 23 až 44, což krajně splňuje podmínku možnosti realizace řezu v daných místech.

vzdálenost x (m)	1	1,5	2	2,5	3
čítatel Coriol. čísla	0,0324367	0,0325455	0,0325898	0,0325942	0,0325925
jmen. Coriol. čísla	0,0318702	0,0318702	0,0318702	0,0318702	0,0318702
Coriolisovo číslo $\alpha$	1,0177751	1,0211870	1,0225796	1,0227179	1,0226639
hodnota derivace $\alpha$	0,0068238	0,0027852	0,0002766	0,0001081	0,0000202

vzdálenost x (m)	3,5	4	4,5
čítatel Coriol. čísla	0,0325922	0,0325924	0,0325928
jmen. Coriol. čísla	0,0318702	0,0318702	0,0318702
Coriolisovo číslo $\alpha$	1,0226538	1,0226610	1,0226739
hodnota derivace $\alpha$	0,0000144	0,0000259	0,0000828

Tab.6 Hodnoty Coriolisova čísla v řezech po 0,5 m

Z tab. 6 je patrné, že hledaný řez pro dodržení přesnosti leží mezi body  $x = 2,5$  a  $x = 3$ , proto bylo provedeno podrobné rozdělení oblasti po 0,1 m a opět vypočteno Coriolisova číslo pro jednotlivé řezy, jak uvádí tab.7.

vzdálenost x (m)	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0
čítatel Coriol. čísla	0,0325942	0,0325941	0,0325938	0,0325932	0,0325928	0,0325925
jmen. Coriol. čísla	0,0318702	0,0318702	0,0318702	0,0318702	0,0318702	0,0318702
Coriolisovo číslo $\alpha$	1,0227179	1,0227143	1,0227035	1,0226847	1,0226718	1,0226639
hodnota derivace $\alpha$	0,0000360	0,0001081	0,0001873	0,0001297	0,0000792	0,0000504

Tab.7 Hodnoty Coriolisova čísla v řezech po 0,1 m

Po zjištění vzdálenosti, kde je již plně vyvinutý laminární profil lze v tomto místě vykreslit rychlostní pole, které je zobrazeno na obr.40, jde tedy o vzdálenost 3 m od počátku. Tento profil použijeme jako okrajovou podmínku na vstupu při řešení proudění v přiváděči na turbínu. Veličiny, které bude obsahovat profil jsou velikost rychlosti, turbulentní kinetická energie a turbulentní rychlost disipace.



Obr.40 Vyplněné kontury velikosti rychlosti po průřezu ve vzdálenosti 3 m od počátku



### 5.3 ŘEŠENÍ PROUDĚNÍ V KAŠNĚ A PŘÍVODU NA TURBÍNU VE FLUENTU

Po vytvoření všech objemů, vysíťování a nastavení okrajových podmínek se v Gambitu pomocí příkazu „export“, vytvoří soubor s koncovkou „.msh.“, který slouží jako vstupní profil Fluentu. Po vložení tohoto souboru do Fluentu následuje tento postup nastavení programu:

- zkontrolujeme základní informace týkající se výpočetní oblasti, hlavně počet buněk a okrajové podmínky
- scale síť, kdy provedeme rozměrovou kontrolu výpočetní oblasti, v našem případě převedeme rozměry sítě z milimetrů na metry
- definujeme základní parametry řešiče (určíme o jakou úlohu jde 2D, 2D osově symetrický model, 3D, stacionární nebo nestacionární úlohu), u této úlohy ponecháme automaticky nastavený 3D model a časově nezávislou úlohu tj. ustálené proudění
- dále volíme typ matematického modelu proudění (laminární nebo turbulentní model), vypočteme si proto velikost Reynoldsova čísla  $Re$ :

$$Re = \frac{v_1 \cdot d_h}{\nu} = \frac{v_1 \cdot \frac{4 \cdot S}{O}}{\nu} = \frac{v_1 \cdot \frac{4 \cdot b \cdot h_s}{2 \cdot (b + h_s)}}{\nu} \quad (5.3)$$

$$Re = \frac{0,523 \cdot \frac{4 \cdot 1,4 \cdot 0,164}{2 \cdot (1,4 + 0,164)}}{99,6 \cdot 10^{-8}}$$

, kde:  $v_1 = 0,523 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$   
 $b = 1,4 \text{ m}$   
 $h_s = 0,164 \text{ m}$   
 $\nu = 99,6 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

$$Re = 154\,173$$

Proto v této úloze definujeme turbulentní dvourovnicový k-epsilon model, se specifikací modelu Realizable s možností modelování u stěny Non-Equilibrium Wall Functions. Ostatní parametry jako konstanty modelu, definice turbulentní viskozity a Prandtlůva čísla ponecháme v základním nastavení

d) následně definujeme proudící tekutinu, v této úloze jde o vodu, proto nahrajeme z databáze Fluentu hodnoty fyzikálních vlastností pro vodu a zkopírujeme je do nabídky materiálů.

e) dalším krokem je nastavení operačních podmínek, zde volíme operační tlak a místo jeho působení, tento tlak se rovná tlaku atmosférickému a působí v místě, kde je definována okrajová podmínka pro vstup, konkrétně souřadnice tohoto bodu leží na středu vstupu v přímce tvořící průsečík okrajových podmínek pro vstup a podmínky symmetry, která tvoří hladinu vody v přívodu. Další operační podmínkou je gravitační zrychlení a jeho směr, v této úloze gravitační zrychlení působí proti ose y a má obvyklou hodnotu  $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ . Poslední touto podmínkou je specifická operační hustota, která se v panelu objeví až po zadání gravitačního zrychlení a v našem případě se rovná nule.

f) dále definujeme okrajové podmínky, ty jsme si nejdříve pojmenovali a specifikovali jejich druh v Gambitu a nyní jim přiřadíme určité hodnoty, které jsou na příslušných hranicích oblasti a také v oblasti proudění. Pro okrajovou podmínku KAPALINA definujeme proudící

medium vodu, kterou jsme si nastavily v předcházejícím bodu „volba materiálu,, . Okrajovou podmínku HLADINA a všechny podmínky s názvem STĚNA necháme v jejich základním nastavení, těm jsme přiřadily typ okrajové podmínky symmetry pro HLADINU a wall pro STĚNU u této podmínky uvažujeme stacionární stěny a využijeme přednastavenou nulovou rychlost. Podmínce VSTUP přiřadíme hodnoty rychlosti, které jsme získali z dříve vypočteného plně vyvinutého laminárního profilu. Spolu s hodnotou rychlosti lze nahrát vstupní hodnoty pro Turbulentní kinetickou energii a Turbulentní rychlosti disipace. Důležitou podmínkou tohoto procesu je, aby souřadnice podmínky VSTUP byly stejné jako souřadnice načteného profilu a to z důvodu správného transformování daných veličin z načteného profilu do vstupu.

g) dále nastavíme ovladače řešení, ty ponecháme v základním nastavení, z čehož plyne, že tlakové členy budou diskretizovány pomocí metody STANDARD a na hybnost, turbulentní kinetickou energii a turbulentní rychlost disipace bylo aplikováno interpolační schéma upwind 1. řádu. U Segregate řešiče, který nám řeší Navier-Stokesovy rovnice a rovnici kontinuity ponecháme schéma SIMPLE, které se používá pro stacionární proudění.

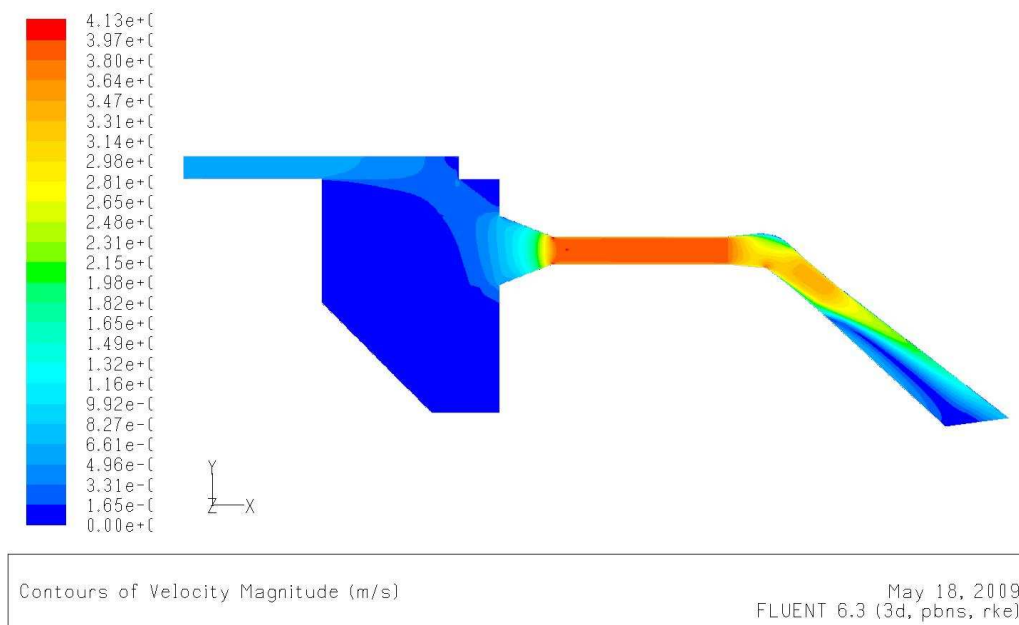
h) poté inicializujeme výpočetní oblast, kde můžeme definovat velikost tlaku a jednotlivé složky rychlosti. V naší úloze definujeme hodnotu rychlosti v ose x, a to z okrajové podmínky pro vstup. Takto provedená inicializace, nám umožní lepší rozběhnutí výpočtu a také stabilnější celkový průběh řešení úlohy.

g) dále definujeme vykreslování reziduálů, které musíme při průběhu numerického výpočtu sledovat. Reziduály nám zobrazuje chybu výpočtu jako střední kvadratickou odchylkou jednotlivých počítaných veličin. Zde lze i definovat i přesnost výpočtu jako hranici konvergence úlohy, pro náš případ tuto funkci neuvažujeme a hranici konvergence si stanovíme až podle průběhu výpočtu z grafického vykreslování. Při tomto postupu průběžně sledujeme vykreslování reziduálu a ve vhodné části výpočtu, podle našeho úsudku, že je úloha již zkonvergovaná, výpočet zastavíme.

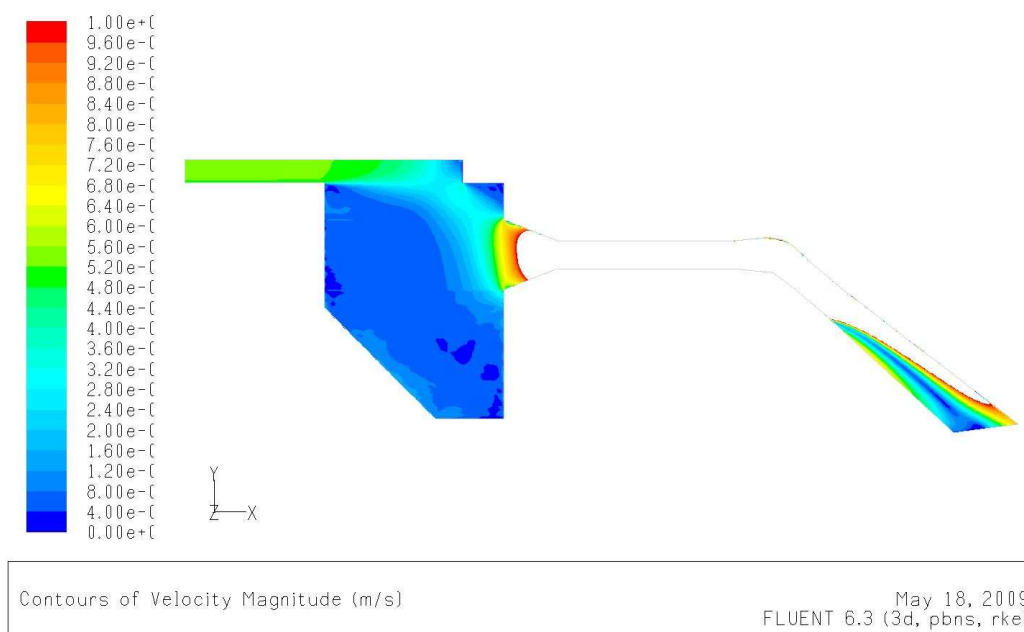
i) v poslední části nastavíme počet iteračních kroků a příkazem „iterate,, spustíme numerický výpočet.

## 5.4 VYHODNOCENÍ PROUDĚNÍ

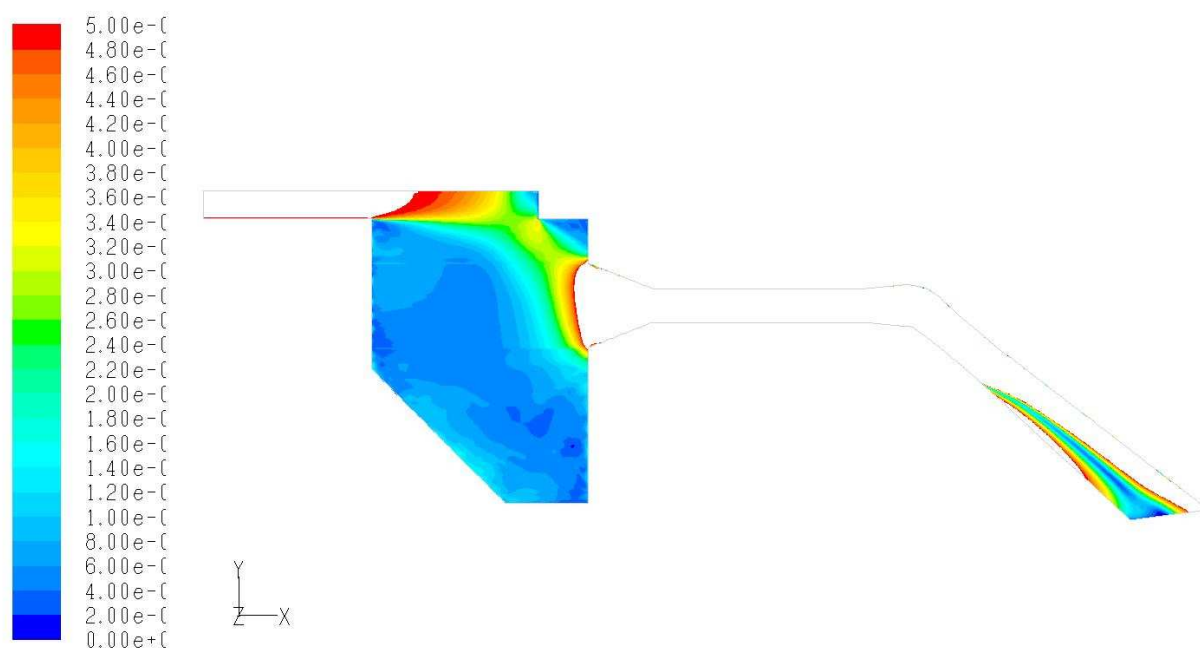
Po zkonvergování výpočtu bylo provedeno vizuální grafické vyhodnocení numerického modelu proudění a to pomocí vyplněných izochar proudových veličin (jako je např. rychlost, tlak, teplota apod.) tedy tzv. kontur, dále pomocí vektorového pole, které lze obarvit i jinými veličinami a ještě také pomocí trajektorií částic. Na obr.41 je vidět průběh velikosti rychlosti v řezu provedeném v počátku osy z. Při podrobnějším náhledu, kdy lze vykreslit jen kontury o příslušné velikosti rychlosti je postupně na obr.42, obr.43 a obr.44 znázorněn průběh směru proudu z přiváděče přes nádrž do potrubí s turbínou.



Obr.41 Vyplněné kontury velikosti rychlosti v ose z



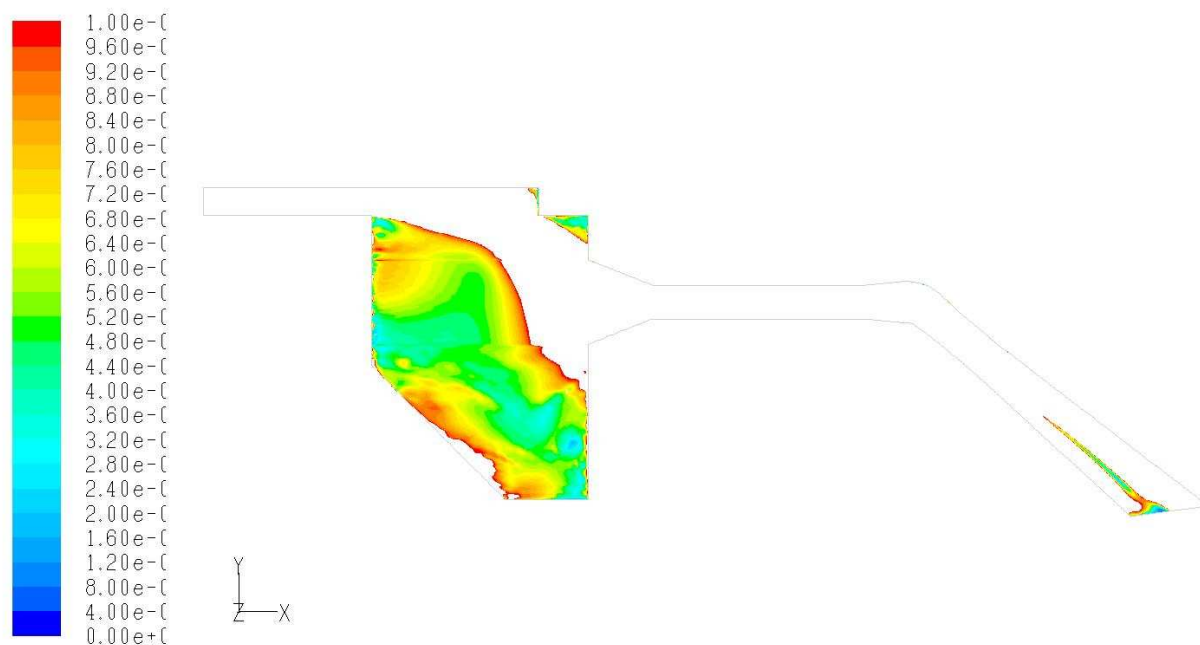
Obr.42 Vyplněné kontury velikosti rychlosti v rozsahu  $0 - 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  v ose z



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

May 18, 2009  
FLUENT 6.3 (3d, pbns, rke)

Obr.43 Vyplněné kontury velikosti rychlosti v rozsahu 0 – 0,5 m·s<sup>-1</sup> v ose z

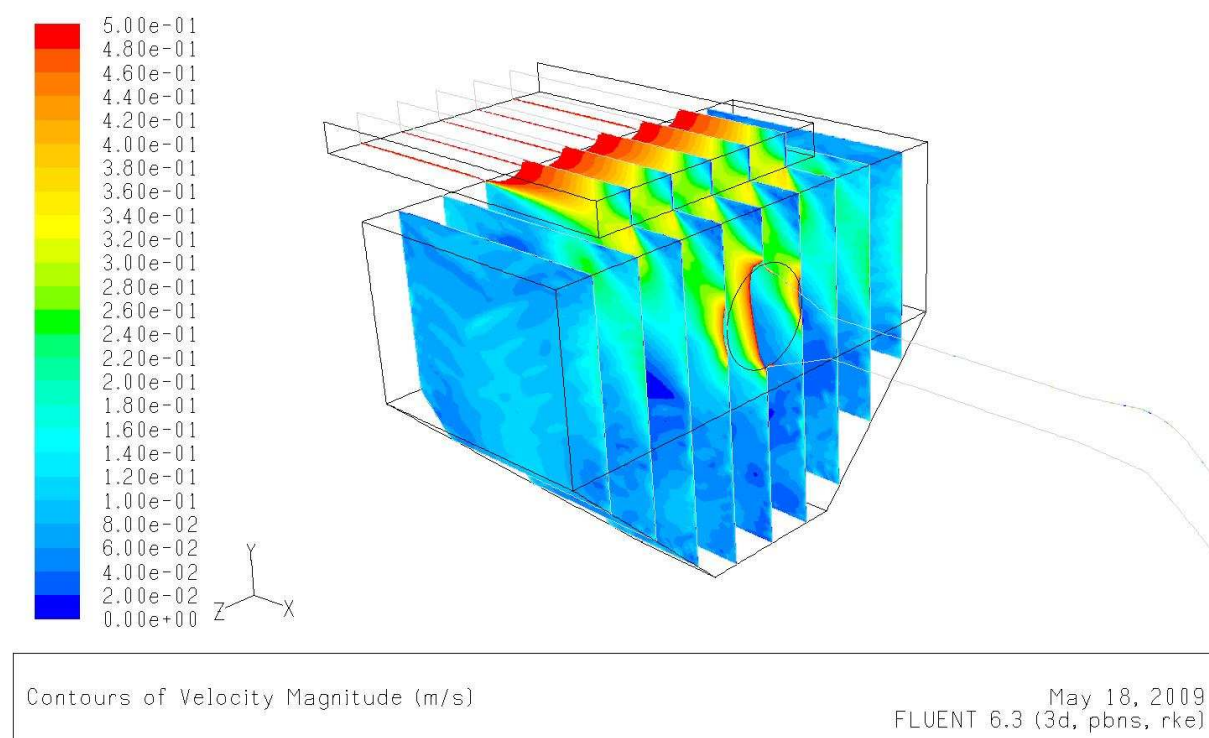


Contours of Velocity Magnitude (m/s)

May 18, 2009  
FLUENT 6.3 (3d, pbns, rke)

Obr.44 Vyplněné kontury velikosti rychlosti v rozsahu 0 – 0,1 m·s<sup>-1</sup> v ose z

Pro lepší znázornění proudění v prostoru lze provést i několik řezů osou z vzdálených od sebe o určitou hodnotu, což je vidět na obr.45 a tím dospět k lepší představě o proudění. Tyto řezy jsou od sebe vzdáleny 250 mm a příslušné kontury jsou v rozsahu velikosti absolutní rychlosti  $0 - 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Z obr.45 je zřejmé, že po přítoku vody do nádrže dochází k značnému víření a turbulentním v celém objemu nádrže. Pro lepší zobrazení proudění nám bude sloužit vykreslení pomocí vektorového pole a to hlavně díky orientace vektorů, ze kterých je vidět směr pohybu kapaliny.

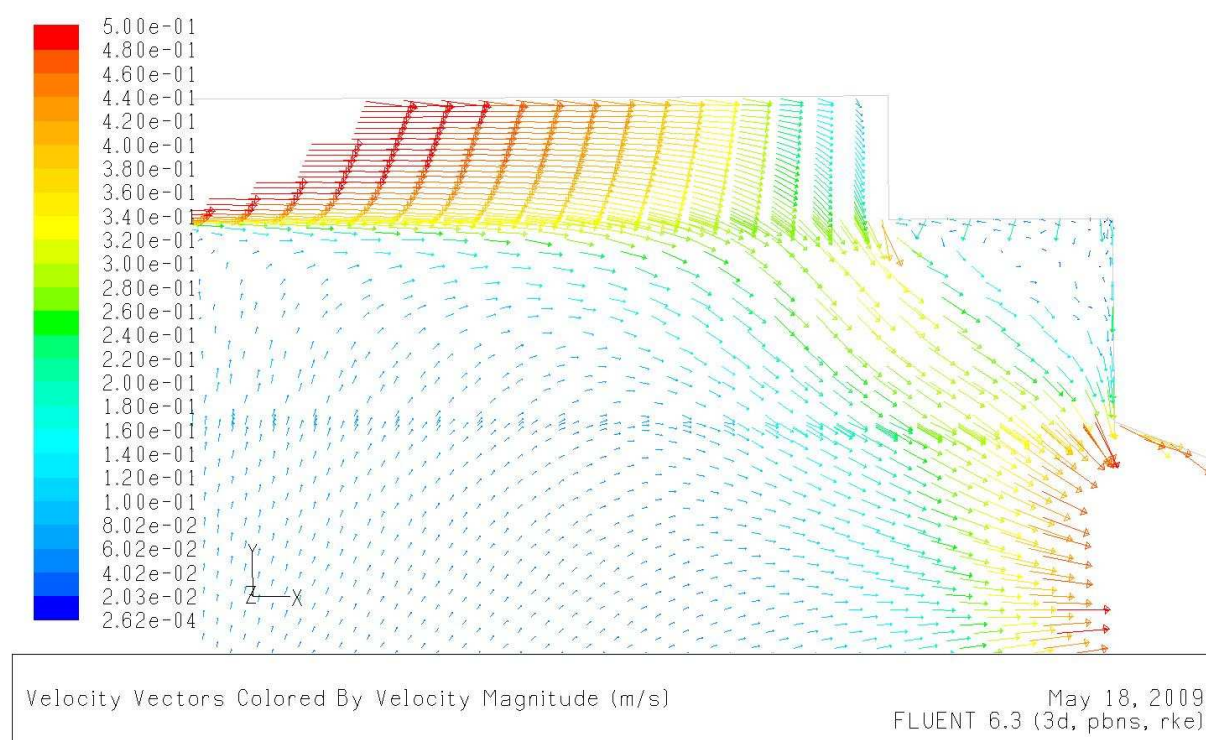


Obr.45 Vyplněné kontury velikosti rychlosti v rozsahu  $0 - 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  v 9 řezech v ose z po 250 mm, včetně geometrické oblasti

Z uvedených obrázků kontur velikosti rychlosti v ose z vyplývají tři zájmové oblasti a to oblast vtoku vody do nádrže a ohyb tohoto proudu. Dále oblast přímé části potrubí na jejímž konci bude umístěna turbína, kde bude důležité rozložení rychlostního profilu v trubce. A nakonec výstupní část savky, která jak už bylo uvedeno není hydraulicky navržena správně a dochází zde k předpokládaným velkým hydraulickým ztrátám.

### 5.4.1 OBLAST NÁTOKU DO KAŠNY A OHYBU PROUDU

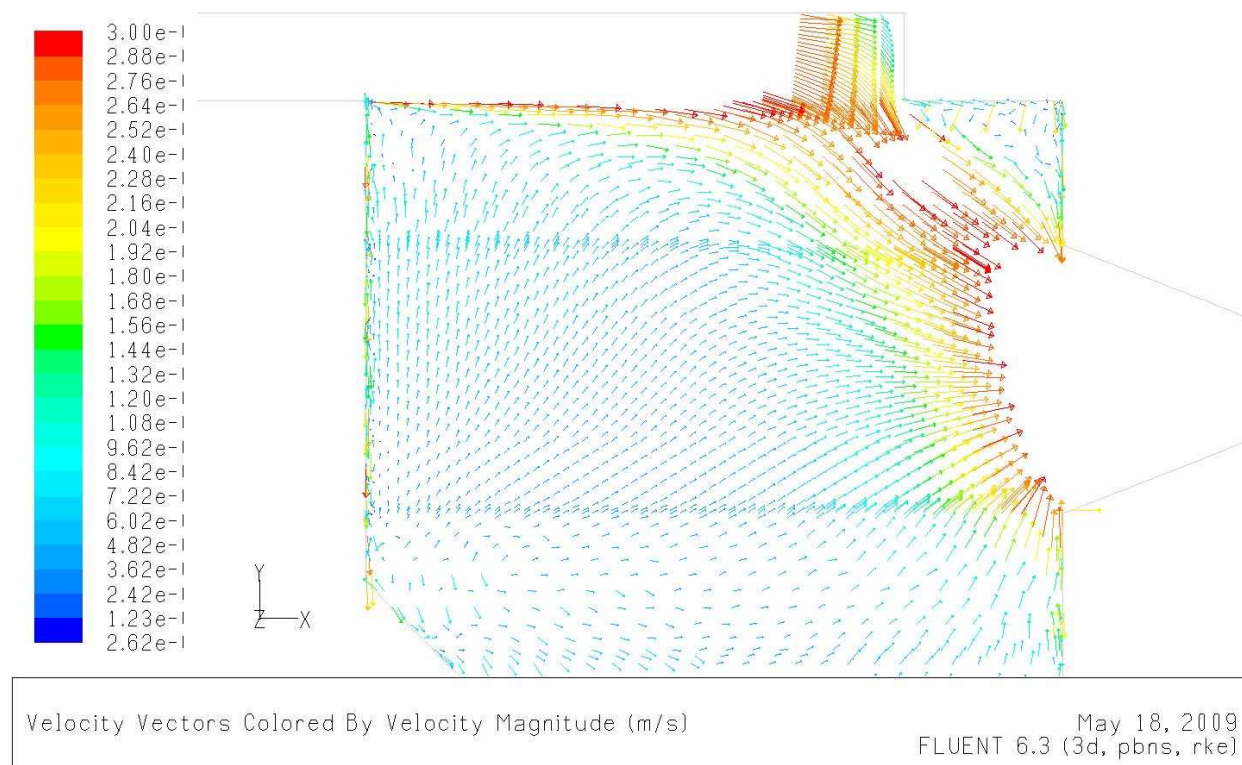
Soustředíme se tedy na první zájmovou oblast, kdy proud vody směřuje z přívodu do nádrže. Výsledkem tohoto zobrazení je vektorového pole vykreslené v určitém vhodném měřítku velikosti a intenzity vektorů. Na tomto obr.46 je vidět rozložení vektorového pole v řezu počátkem osy z, těsně pod přívodem. Působí zde na sebe dva proudy, kdy první jde ze směru přívodu a je bržděn přepadovou deskou, čímž dojde k jeho ohybu. Po této změně směru je částečně ovlivňován působením druhého proudu, který má přibližně tvar velkého "S". Toto vzájemné působení má jen částečný vliv na nátok do vstupního kužele potrubí a ve výsledku, také díky vhodně zvolenému poloměru vstupního kužele a jeho poloze, je vektorové pole v této důležité části poměrně rovnoměrné a tedy přijatelné z hlediska ztrát vzniklých špatným nátokem do potrubí. Určitě, ale zde bude k nějakým ztrátám vlivem ohybu proudu a šikmým nátokem vody do potrubí docházet. Jejich velikost je vyčíslena v kapitole 2.3.2 při určování čistého spádu, rovnice (2.13).



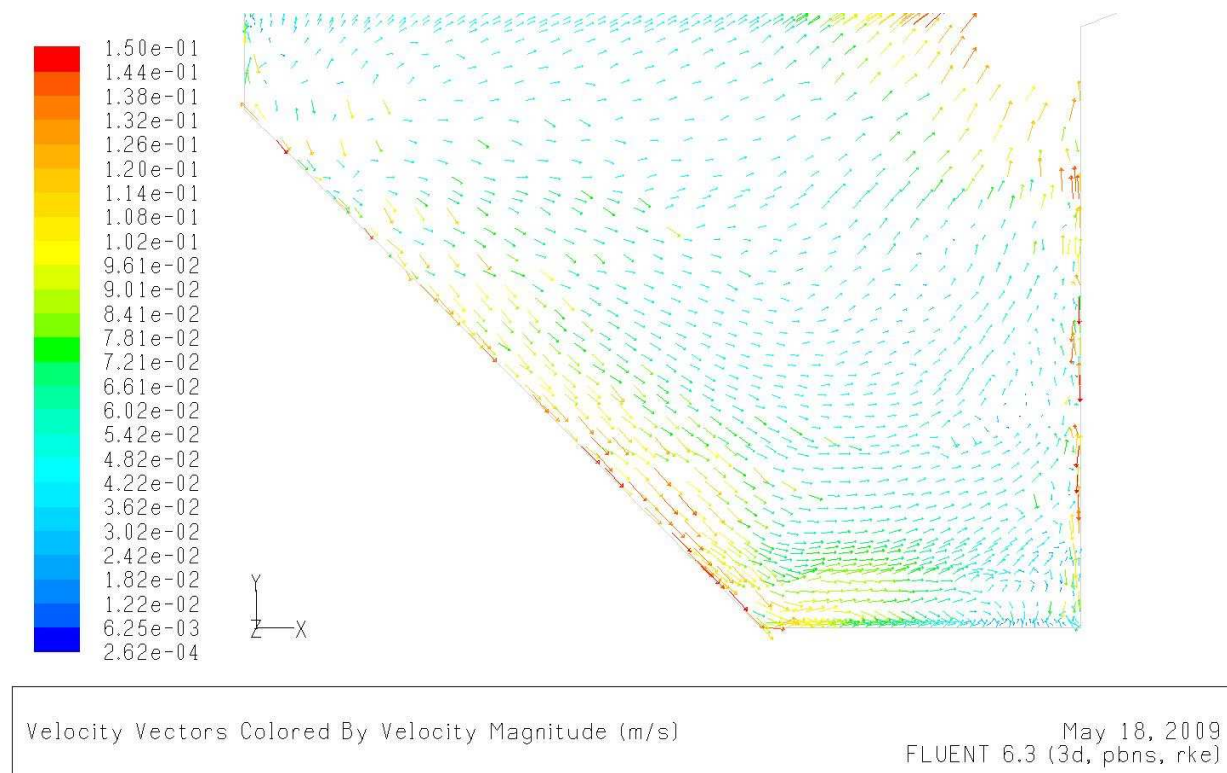
Obr.46 Detail vektorového pole horní poloviny nádrže v řezu počátkem osy z, v místě nátoku z přívodu do potrubí (velikost rychlosti 0 – 0,5 m·s<sup>-1</sup>)

Na dalším obr.47 je vidět vektorové pole rychlosti v horní polovině nádrže, je zde zobrazen celý tvar druhého proudu. Ten má počátek u zadní stěny nádrže, kde dochází k velkému víření a vektory rychlosti jsou zde orientovány do prostoru nádrže, což je později podrobně vidět pomocí trajektorií částic. Víření v zadní části nádrže ovlivňuje i celý dolní objem, ale vlivem šikmých stěn je proudění kapaliny usměrněno směrem k čelní stěně nádrže, kde sice probíhají menší víry jak ukazuje obr.48, ale ty jsou mimo naši zájmovou oblast.





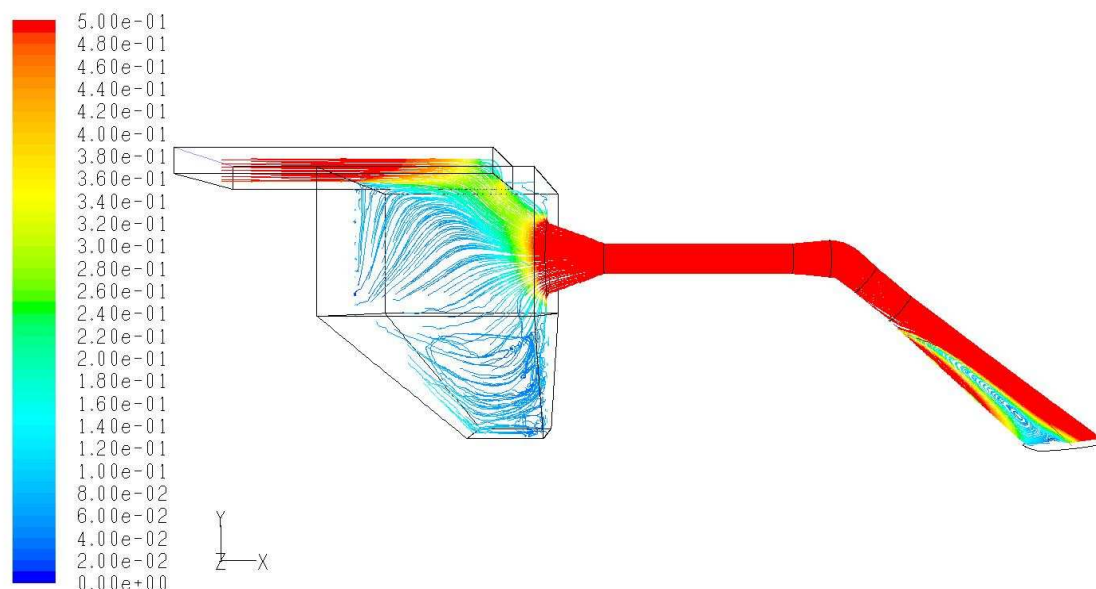
Obr.47 Detail vektorového pole horní poloviny nádrže v řezu počátkem osy z  
(velikost rychlosti 0 –  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )



Obr.48 Detail vektorového pole v dolní polovině nádrže (velikost rychlosti 0 –  $0,15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )



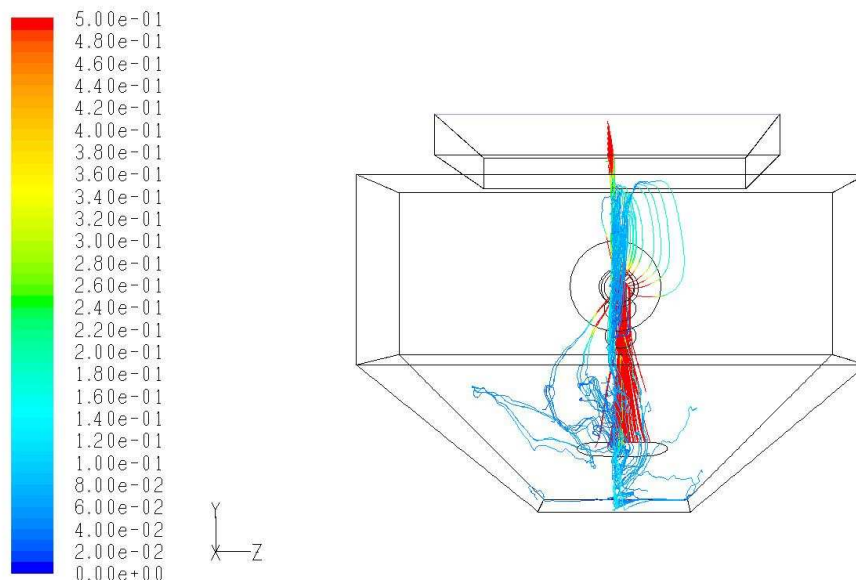
Další výhodné zobrazení, které lze využít při vizuálním hodnocení proudění je vykreslení trajektorií obr.49 . Zde je vidět pozvolný přechod esovitěho tvaru proudu do dolní části nádrže a celý jeho tvar se roztahuje ve směru osy x a plynule je tak zaplněn vstupní kužel do potrubí. Při dalším pohledu zezadu obr.50 je vidět prostorové zakřivení tohoto proudu, kdy je celý proud v prostoru vychýlen ve vertikálním směru na každé straně přibližně o  $10^\circ$ .



Pathlines Colored by Velocity Magnitude (m/s)

May 18, 2009  
FLUENT 6.3 (3d, pbns, rke)

Obr.49 Trajektorie částic velikosti rychlosti v ose z (vel. rychlosti  $0 - 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), čelní pohled



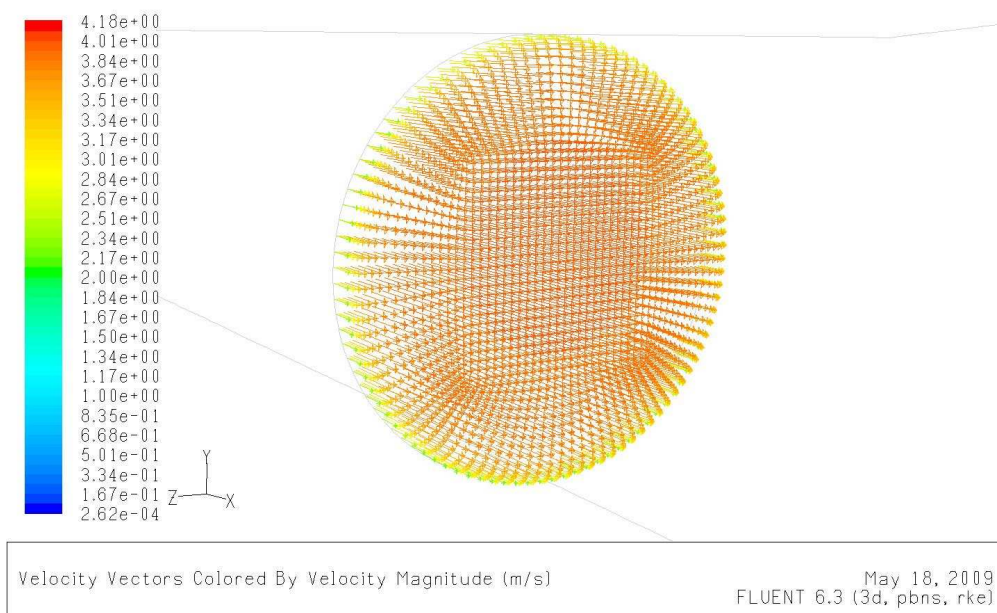
Pathlines Colored by Velocity Magnitude (m/s)

May 18, 2009  
FLUENT 6.3 (3d, pbns, rke)

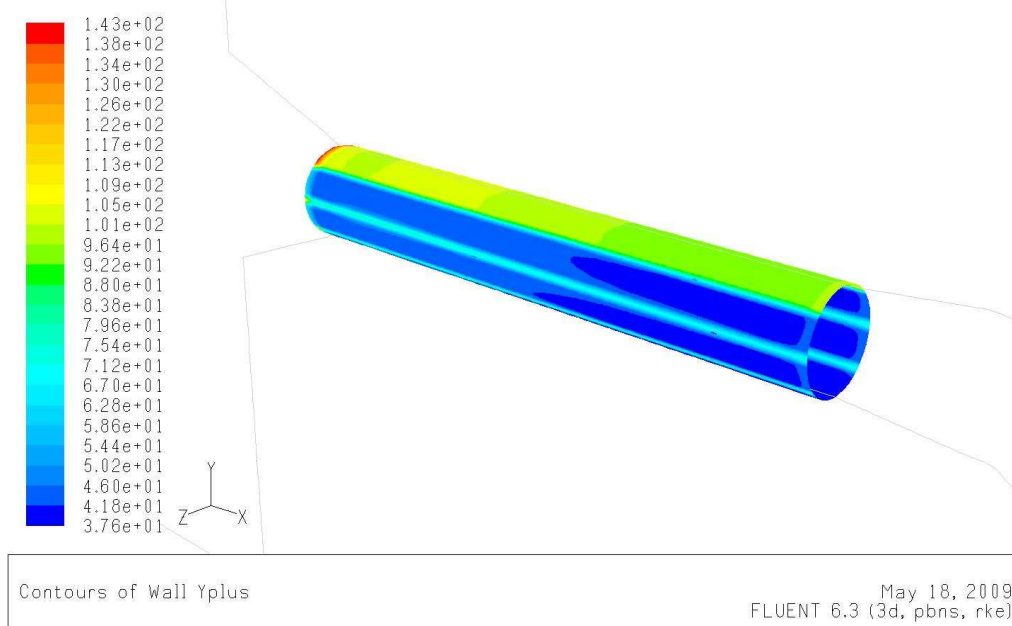
Obr.50 Trajektorie částic velikosti rychlosti v ose z (vel. rychlosti  $0 - 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )  
pohled zezadu

## 5.4.2 OBLAST PŘÍVODU NA TURBÍNU

Tvar profilu jaký se vyvine po nátoku do přímé části potrubí bude důležitý pro správný vstup vody na lopatky turbíny. Voda by měla na Vírovou turbínu vstupovat rovnoběžně s osou rotace kola bez zjevných víření a dalších negativních jevů. Tomuto předpokladu odpovídá zobrazení vektorového pole obr.51, těsně před vstupem na turbínu, takže tato podmínka byla splněna. Pro podložení správnosti výpočtu proudění v trubce byla ověřena hodnota bezrozměrné tloušťky mezní vrstvy  $y^+$ , která by měla nabývat hodnot v rozsahu 30 až 120. Jak ukazuje obr.52 hodnota  $y^+$  dosahuje po ve většině plochy trubky velikosti 37,6 až 110 v krajním případně za vstupním kuželem 143, což je také přijatelná hodnota a výsledky proudění mohou být považovány za správné.



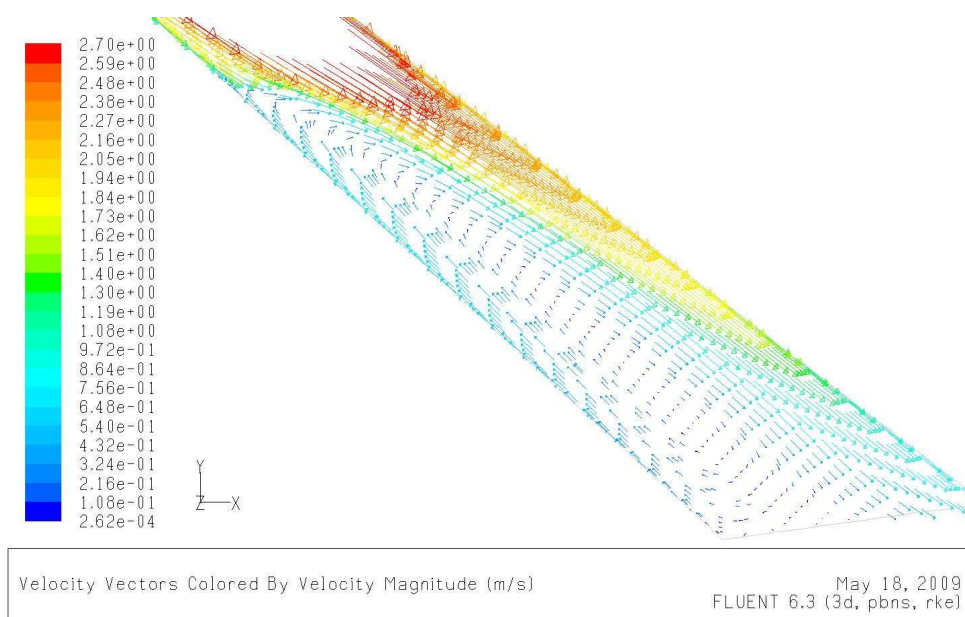
Obr.51 Detail vekt. pole obarveného velikostí rychlosti v potrubí v řezu těsně před turbínou



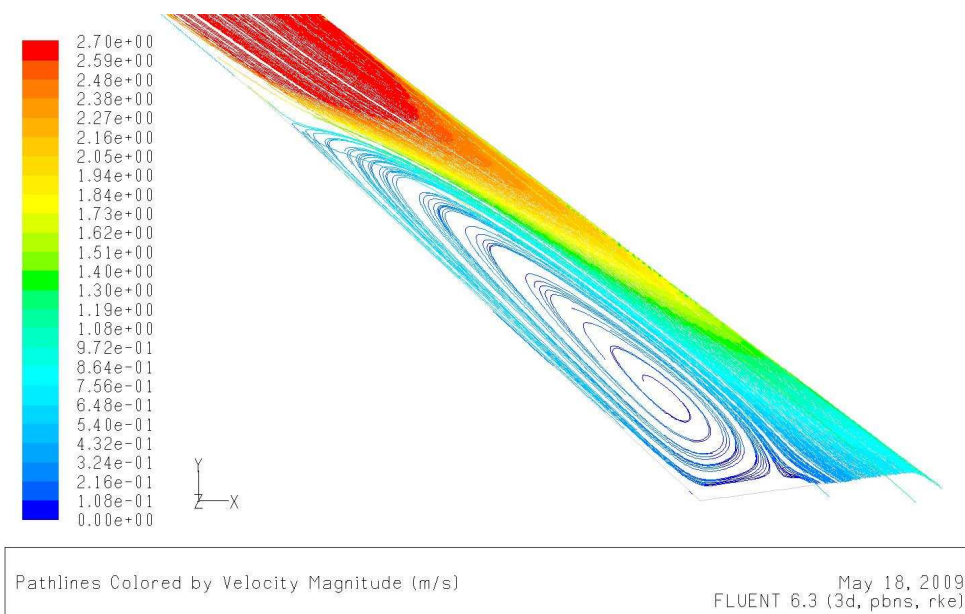
Obr.52 Vyplněné kontury hodnot  $y^+$  po stěně potrubí

### 5.4.3 OBLAST VÝSTUPU ZE SAVKY

Protože hydraulický návrh savky byl proveden podle určitých předpokladů uvedených v kapitole 4.5, ale dále už tento návrh nebyl rozvíjen a optimalizován. Bylo předpokládáno, že zde bude docházet k velkým hydraulickým ztrátám, způsobených zpětným prouděním téměř v celé dolní části savky, jak ukazuje detail vektorového pole na obr.53. Pro názornější zobrazení tohoto negativního děje, lze vykreslit trajektorie částic v dolní části savky jak je vidět na obr.54. Tyto hydraulické ztráty způsobí snížení účinnosti savky, která je zvláště u Vírové turbíny velmi důležitá. Lze je odstranit jejím správným hydraulickým návrhem a vkládáním vhodných vestaveb a tvarových úprav.



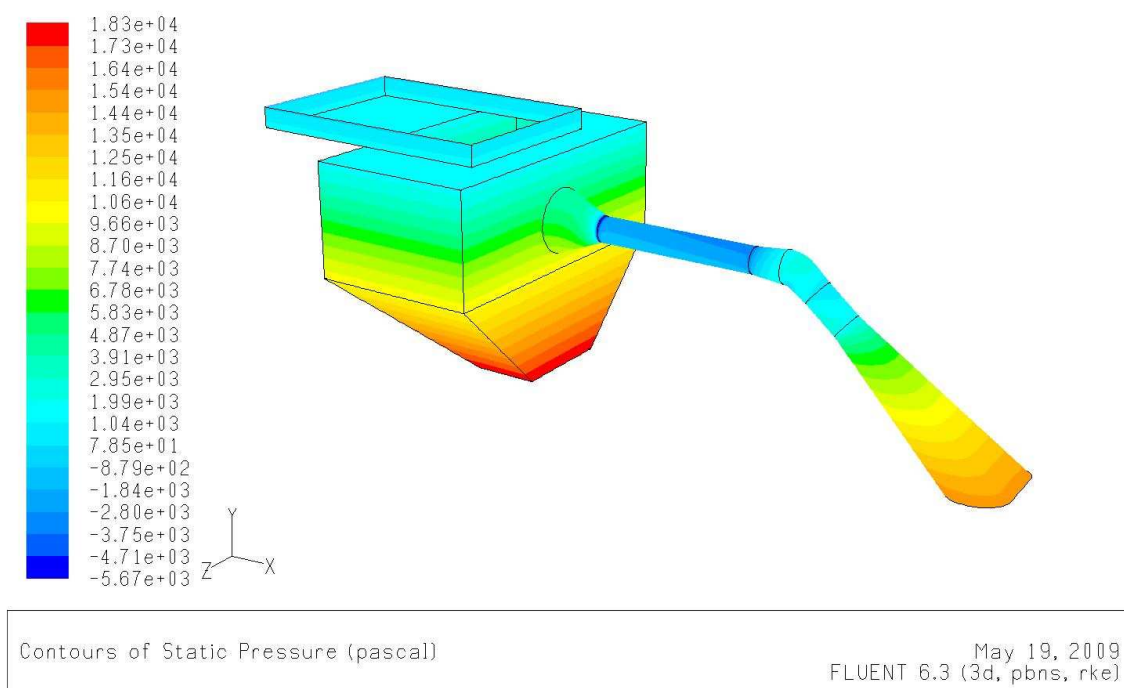
Obr.53 Detail vektorového pole v savce v řezu počátkem osy z (vel. rychlosti 0 – 2,7 m·s<sup>-1</sup>)



Obr.54 Detail trajektorie částic vel. rychlosti v řezu počátkem osy z (pro  $v = 0 - 2,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

#### 5.4.4 ROZLOŽENÍ HYDROSTATICKÉHO TLAKU

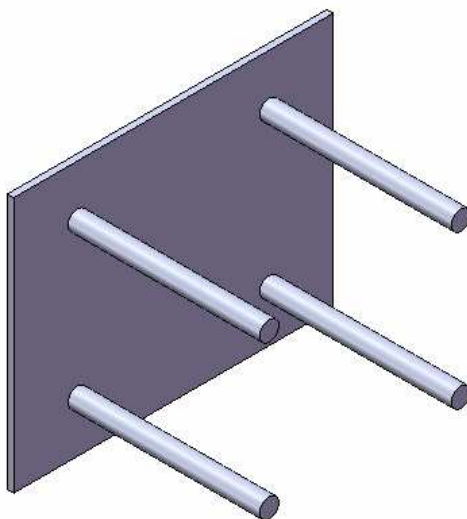
Pro konstrukci nádrže je důležitá hodnota hydrostatického tlaku, jehož hodnoty byly vyčísleny v kapitole 4.1 tab.3. Níže na obr.55 je vidět jak tento tlak narůstá s rostoucí výškou vodního sloupce vzhledem k přívodu a u dna pak hydrostatický tlak dosahuje nejvyšších hodnot. Naopak nejnižší hodnoty tlaku jsou v potrubí, kde vlivem velké rychlosti vzniká podtlak, tato hodnota tlaku je také ovlivněná špatným zadáním okrajových podmínek na vstupu, kdy pro vnitřní průměr potrubí 200 mm, které byly zvoleny v závislosti na průměru turbíny  $D_P = 0,1913$  m a  $Q_P = 0,0946$  m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> byl dosazen hodnoty rychlosti pro průtok  $Q_{op} = 0,12$  m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> místo hodnot pro  $Q_P = 0,0946$  m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>. Při realizaci projektu a ověřování výsledků proudění by měly být do vstupních hodnot zadány správné rychlosti při  $Q = 0,0946$  m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> pro průměr potrubí 200 mm tj. varianta řešení A (pokud bude realizována) nebo při  $Q_{op} = 0,12$  m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> pro průměr potrubí zvolený v závislosti na průměru turbíny  $D = 0,2115$  m tj. varianta řešení B nebo parametry varianty C, jak je uvedeno v kapitole 3.7.



Obr.55 Vyplněné kontury hydrostatického tlaku na jednotlivých stěnách systému MVE

## 6 POTŘEBNÉ STAVEBNÍ ÚPRAVY

Stavební úpravy by neměly být nějak rozsáhlé, aby se zbytečně nezasahovalo do statiky budovy. Půjde pouze o vybudování betonových základů v podlaze místnosti, ve kterých budou uloženy šrouby pro patky nádrže, savky a malé lávky pro dostupnost šoupátka. Polohy a rozměry jednotlivých základů jsou zobrazeny v příloze 8 – stavební úpravy. Dále by měly být do zdi místnosti zabudovány stěnové desky pro uložení lávky, nosníku pod přepadem, vodního kola, přívodu, malé lávky a to v příslušných polohách zobrazených rovněž v příloze 8. Tyto stěnové desky obr.56 se skládají z čtvercového nebo obdélníkového plechu, na který jsou ze zadní části přivařeny čtyři ocelové pruty. Deska je pomocí prutů zazděna do místnosti a na její čelní plochu lze připevnit kotvící prvek např. pro lávku nebo nosník pod přepadem. Tímto způsobem bude zajištěna přesná poloha dílů MVE v místnosti. V poslední části stavebních úprav by měly být vytvořeny otvory ve zdi pro uložení profilů zajišťujících stabilitu nádrže proti převrhnutí.



Obr.56 Stěnová deska

## 7 ČÁSTEČNÉ EKONOMICKÉ HODNOCENÍ

Tato kapitola by měla sloužit jako přibližná představa finančních nákladů souvisejících s výstavbou MVE, lze to považovat za dílčí ekonomické zhodnocení projektu. Podle informací zadavatele je na projekt přístupná částka 500 000 Kč.

### 7.1 MNOŽSTVÍ VYROBENÉ ELEKTRICKÉ ENERGIE A JEJÍ VÝKUPNÍ CENY

Množství vyrobené elektrické energie pro variantu A (kdy hřídel je přímo spojena s generátorem a průměr turbíny je přepočítaný na požadované nadsynchronní otáčky) v jenom roce  $E_{CA}$  se vypočítá z rovnice (7.1) a to podle vypočteného výkonu v kapitole 3.5. Ve výpočtu získané energie není zahrnuta účinnost generátoru. Protože v řece byl po dobu měření dostatek vody, kdy průtok v řece neklesal po 89,5 % doby měření pod  $0,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . V závislosti na tomto stavu bylo zvoleno 7000 hodin za rok jako vhodná doba fungování turbíny. Potom je vypočtené množství elektrické energie  $E_{CA}$  vyrobené za jeden rok:

$$E_{CA} = P \cdot n_h = 1237,6 \cdot 7000 \quad (7.1)$$

, kde:  $P$  - 1237,6 W  
 $n_h$  - 7000 h/rok

$$E_{CA} = 8663200 \text{ Wh/rok} = \underline{8,6632 \text{ MWh/rok}}$$

Pro další variantu B řešení projektu, kdy bude použita převodovka a optimální průtok má velikost  $Q_{op} = 0,12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  bude výkon  $P_B$ :

$$P_B = Q_{op} \cdot H \cdot \rho \cdot g \cdot \eta_C = 0,12 \cdot 1,67 \cdot 998,2 \cdot 9,81 \cdot 0,80 \quad (7.2)$$

, kde:  $Q_{op} = 0,12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$   
 $H = 1,67 \text{ m}$   
 $\rho = 998,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$   
 $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$   
 $\eta_C = 0,8$

$$P_B = 1570 \text{ W}$$

potom je množství vyrobené el. energie v jednom roce  $E_{CB}$ , bez uvažování mechanické účinnosti:

$$E_{CB} = P_B \cdot n_h = 1570 \cdot 7000 \quad (7.3)$$

$$E_{CB} = 10\,989\,358 \text{ Wh/rok} = \underline{10,989358 \text{ MWh/rok}}$$

Třetí varianta C uvažuje zvýšení optimálního průtoku na  $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$  a rovněž spojení turbínového hřídele s generátorem pomocí převodovky. Zde bude docházet i ke změně spádu, ale hodnota zvolená v kapitole 2.3.2 je brána pro tento výpočet jako konstantní, pak bude výkon  $P_C$ :

$$P_C = Q_{op2} \cdot H \cdot \rho \cdot g \cdot \eta_C = 0,15 \cdot 1,67 \cdot 998,2 \cdot 9,81 \cdot 0,80 \quad (7.4)$$

, kde:  $Q_{op2} = 0,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$   
 $H = 1,67 \text{ m}$   
 $\rho = 998,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$   
 $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$   
 $\eta_C = 0,8$

$$P_C = 1962,4 \text{ W}$$



potom je množství vyrobené el. energie v jednom roce  $E_{CC}$ , ale vlivem většího průtoku se sníží početní dní chodu turbíny na 6500 h/rok:

$$E_{CC} = P_C \cdot n_{hC} = 1962,4 \cdot 6500 \quad (7.5)$$

$$E_{CC} = 12\,755\,505 \text{ Wh/rok} = \underline{12,755505 \text{ MWh/rok}}$$

Ceny elektrické energie pro malé vodní elektrárny stanovuje Energetický regulační úřad a to vždy na jeden kalendářní rok dopředu a jsou garantovány po dobu 15 let od uvedení data MVE do provozu. Existují dva druhy cen a to výkupní ceny a zelené bonusy. Pokud provozovatel zvolí podporu formou výkupní ceny, je provozovatel regionální distribuční soustavy nebo provozovatel přenosové soustavy povinen od výrobce vykoupit veškerou vyrobenou elektřinu z daného zdroje. Pokud však provozovatel zvolí podporu formou zeleného bonusu, musí si sám najít svého odběratele elektrické energie. Hlavním přínosem systému zeleného bonusu je, že výrobce přímo ovlivňuje výši výnosů za vyrobenou elektřinu, protože sám rozhoduje o tom, komu a za jakou cenu vyrobenou elektřinu prodá. K dohodnuté tržní ceně je pak výrobci vyplácen zelený bonus, který je pevně stanoven Energetickým regulačním úřadem. Nevýhodou tohoto způsobu je riziko, že výrobce vyrobenou elektřinu neprodá (nenajde pro vyrobenou elektřinu odběratele). V tomto případě nemá výrobce 100% odbyt vyrobené elektřiny, jak je tomu v případě podpory formou výkupních cen, jak uvádí [17]. Výkupní ceny elektřiny a zelené bonusy nelze kombinovat.

Datum uvedení do provozu	Výkupní ceny elektřiny dodané do sítě v Kč/MWh	Zelené bonusy v Kč/MWh
MVE uvedená do provozu v nových lokalitách po 1. lednu 2008 včetně	2700	1260
MVE uvedená do provozu v nových lokalitách od 1. ledna 2006 do 31. prosince 2007	2540	1100
MVE uvedená do provozu po 1. lednu 2005 včetně a rekonstruovaná MVE	2300	860
MVE uvedená do provozu před 1. lednem 2005	1790	350

Tab. 8 Výkupní ceny a zelené bonusy pro MVE, převzato z [17]

Pro výpočet předpokládaného zisku z prodeje elektřiny pro všechny varianty řešení bude brána výkupní cena stanovená Energetickým regulačním úřadem, protože získání peněz ze zeleného bonusu je podmíněno sehnáním si vlastního odběratele, který není vybrán. Potom je předpokládaný zisk  $Z_{EA}$  z vyrobené el. energie pro variantu A:

$$Z_{EA} = E_{CA} \cdot C \quad (7.6)$$

, kde:  $E_{CA} = 8,6632 \text{ MWh/rok}$   
 $C = 2700 \text{ Kč/MWh}$

$$Z_{EA} = 8,6632 \cdot 2700$$

$$\underline{Z_{EA} = 23\,391 \text{ Kč/rok}}$$



Zisk  $Z_{EB}$  z vyrobené el. energie pro variantu B:

$$Z_{EB} = E_{CB} \cdot C \quad (7.7)$$

, kde:  $E_{CB} = 10,989358$  MWh/rok

$$Z_{EB} = 10,989358 \cdot 2700$$

$$\underline{Z_{EB} = 29\,671 \text{ Kč/rok}}$$

Zisk  $Z_{EC}$  z vyrobené el. energie pro variantu C:

$$Z_{EC} = E_{CC} \cdot C \quad (7.8)$$

, kde:  $E_{CC} = 12,755505$  MWh/rok

$$Z_{EC} = 12,755505 \cdot 2700$$

$$\underline{Z_{EC} = 34\,440 \text{ Kč/rok}}$$

## 7.2 PŘEDPOKLÁDANÉ NÁKLADY NA REALIZACI MVE

Jako náklady v této kapitole budou brány pouze finanční prostředky určené pro pořízení normalizovaných profilů a plechů z nerezové oceli ČSN 17 240 použitých pro konstrukci jednotlivých dílů MVE nebude proto brána v úvahu např. hodnota provedené práce apod. Kromě seznamu profilů uvedených příloze 5 a 6 pro konstrukci nádrže, přívodu a přepadu byly použity profily i pro konstrukci lávky, přívodu k vodníku kolu, rámu potrubí a na rám generátoru. V tab.9 jsou uvedeny pro názornost ceny s DPH některých profilů.

	cena za 1m [Kč]	délka profilu [m]	celk. cena bez DPH [Kč]	celk. cena s DPH [Kč]
L 100x100x8	2205	2	4410	5247,9
L 80x80x8	1387	24	33288	39612,72
L 50x50x5	452	33	14916	17750,04
L 40x40x5	280	15,3	4284	5097,96
4 HR 40	2236	10	22360	26608,4

Tab.9 Příklad ceny jednotlivých profilů

Výsledná cena použitých normalizovaných profilů a plechů pro konstrukci nekomerčně vyráběných dílů MVE zobrazených v příloze 4 – sestava MVE je 313 116 Kč. Na komerčně vyráběné díly nebyla vypsána poptávka, proto nejsou známy jejich ceny a nejsou tedy uvedeny v tomto ekonomickém hodnocení.

Pro rozhodnutí zda se projekt bude realizovat je nejdůležitější jeho návratnost. Protože náklady na materiál jsou 313 116 Kč a v kombinaci s ostatními náklady tato částka ještě určité poroste budou předpokládány v současnosti maximální dostupné finanční prostředky ve výši 500 000 Kč, což je přibližně částka kterou má zadavatel k dispozici na provedení projektu. Potom pro tři varianty řešení jsou vypočteny tyto návratnosti  $T$ :

$$\text{a) varianta A:} \quad T_A = \frac{I}{Z_{EA}} = \frac{500000}{23391} \quad (7.9)$$

$$T_A = 21,4 \text{ roku}$$

b) varianta B: 
$$T_B = \frac{I}{Z_{EB}} = \frac{500000}{29671} \quad (7.10)$$

$$T_B = 16,9 \text{ roku}$$

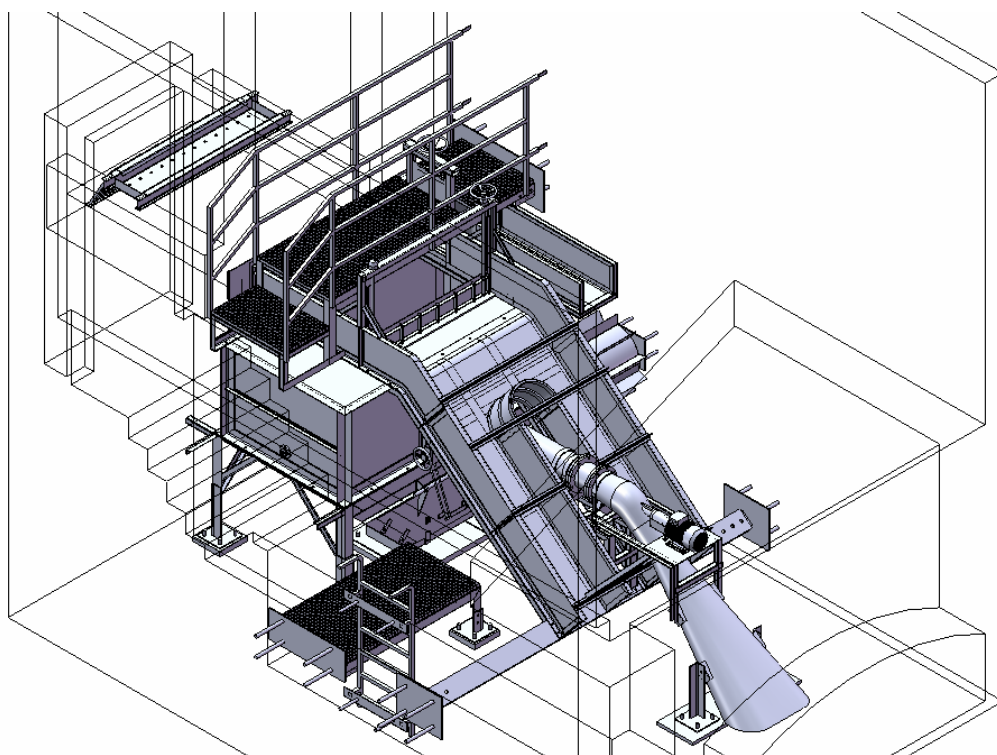
c) varianta C: 
$$T_C = \frac{I}{Z_{EC}} = \frac{500000}{34440} \quad (7.11)$$

$$T_C = 14,5 \text{ roku}$$

Nejlepší hodnotou návratnosti vložených investic je varianta C, protože z ní získáváme největší množství vyrobené energie. Celkový výsledek není z hlediska posouzení o provedení projekt zcela vypovídající, protože nebyla provedena úplná kalkulace všech nákladů spjatých s výstavbou MVE, které by tak po tomto provedení mohli narůst do nepřijatelných hodnot. Z obecného hlediska je získaná doba návratnosti přibližně 15 let přijatelná a v praxi často dosažená hodnota doby návratnosti mnohých podobných projektů.

## 8 ZÁVĚR

Ze zjištěných parametrů určené lokality byl proveden návrh vodné turbíny, dále byl vypočítán průměr jejího oběžného kola a určen dosahovaný výkon. V závislosti na vypočtených hodnotách otáček turbíny byly navrženy dva způsoby řešení spojení hřídele generátoru a turbíny. U varianty A bylo spojení hřídele přímé jen pomocí spojky a požadovaná rychloběžnost byla dosažena snížením průměru oběžného kola. Protože toto řešení vedlo ke snížení vyráběné elektrické energie za rok, bylo navrženo nové řešení, tedy varianta B, kdy jsou obě hřídele spojeny pomocí převodovky, která zajistí požadované nadsynchronní otáčky. U varianty C jde pouze o zvýšení návrhového optimálního průtoku turbíny varianty B z  $0,120 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  na  $0,150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  pro tuto variantu C, rychloběžnost byla opět zajištěna převodovkou. Navýšení průtoku bylo provedeno z důvodů využití většího průtoku v řece, které prokázaly zjištěné hodnoty průtoků z ČHMU. Dále byla vytvořena základní projektová dokumentace MVE pro tuto lokalitu. Návrh byl proveden tak, aby se celé zařízení MVE vměstnalo do místnosti pro to určené, jak ukazuje obr.57 a zároveň splnilo požadavky provozu. V poslední části bylo posouzeno proudění v přiváděči na turbínu, kdy byl vymodelován celý systém MVE. Výsledky tohoto výpočtu byly využity při určování čistého spádu, při návrhu tvaru nádrže a určování správné polohy vstupního kužele potrubí.



Obr.57 Celkový pohled na MVE

Při realizaci projektu by měl být v první řadě s jistotou správně určen návrhový průtok pro turbínu a to pomocí dat z ČHMU, získaných po podepsání smlouvy. Tyto data o průtocích jsou shromažďována několik let a tak, by měli podat dostatečnou představu o průběhu průtoku v roce. Dále by měli být vypracovány pevnostní výpočty u navrhovaných dílů MVE, protože v této práci nebyly provedeny a je možné, že došlo při jejich návrhu k poddimenzování nebo naopak předimenzování některých částí, hlavně jde o rámy nádrže, přívodu a přepadu. Velmi důležité je, aby byla hydraulicky správně navržena savka. Zde tento návrh nebyl proveden a to z důvodů, že úkol je mimo rozsah zadání práce, ale v kapitole 4.5 je uveden nástin možných řešení. Při řešení úkolu modelování proudění byla nedopatření způsobena chyba, kdy pro navržený vnitřní průměr potrubí 200 mm byla v okrajových podmínkách na vstupu zadána rychlost pro optimální průtok  $Q_{op} = 0,12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  místo rychlosti pro  $Q_P = 0,0946 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Vzhledem k tomu, že s variantou A, pro kterou přísluší tento průtok  $Q_P = 0,0946 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  se již dále pro projekt nepočítá, protože nedosáhne požadovaným způsobem asynchronních otáček byl by správný postup následující: s ohledem na kratší návratnost projektu uvažujeme variantu C, kdy je  $Q_{op2} = 0,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a  $D_2 = 0,241 \text{ m}$ . Potom navrhujeme průměr potrubí např. 250 mm, změníme geometrii potrubí a v okrajových podmínkách na vstupu dosadíme rychlost pro  $Q_{op2} = 0,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  s uvažováním výšky hladiny pro  $Q_{op2}$ .

Projekt by měl sloužit jako ideový návrh MVE pro tuto lokalitu a v případě dosažení návratnosti vložených investic v období do 15 let by měl být podle mého názoru realizován.

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Využívání vodní energie v ČR [on line], 2009, poslední revize 22.5.2009  
Dostupné z:< <http://www.cez.cz/cs/energie-a-zivotni-prostredi/energie-z-obnovitelnych-zdroju/voda/informace-o-vodni-energetice.html> >
- [2] Druhy OZE [on line], 2009, poslední revize 22.5.2009  
Dostupné z:< <http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/vodni-energie> >
- [3] Energie vody [on line], 2009, poslední revize 22.5.2009  
Dostupné z:< <http://www.ekowatt.cz/cz/informace/energie-vody> >
- [4] NOSKIEVIČ, J. a kol.: *Mechanika tekutin*, celostátní vysokoškolská učebnice pro strojní fakulty VŠ, SNTL/ALFA, Praha 1987
- [5] NECHLEBA, M.: *Vodní turbíny, jejich konstrukce a příslušenství*, SNTL, Praha 1962
- [6] HES, S.: *Hydroenergetické využití velmi malých spádů v závislosti na ekonomické efektivitě*, ČVUT, Praha 2008  
Dostupné z:< <http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/soutez/hes.pdf> >
- [7] Abeceda vodních pohonů [on line], 2009, poslední revize 15.3.2009  
Dostupné z:< <http://mve.energetika.cz/> >
- [8] Vírová turbína od F.Pochylého [on line], 2009, poslední revize 22.5.2009  
Dostupné z:< <http://www.vutium.vutbr.cz/udalosti/u0404.pdf> >
- [9] NĚMEC, T. *Návrh krátké sací trouby pro vírovou turbínu*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006. 86 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Rudolf, Ph.D
- [10] Vírová turbína [on line], 2009, poslední revize 7.2.2009  
Dostupné z:< [http://documents.jic.cz/vut2\\_virova\\_turbina.pdf](http://documents.jic.cz/vut2_virova_turbina.pdf) >
- [11] Bánkiho turbína [on line], 2009, poslední revize 22.5.2009  
Dostupné z:< [http://www.hamo.cz/bankiho\\_turbina.htm](http://www.hamo.cz/bankiho_turbina.htm) >
- [12] Terapol nerezové oceli [on line], 2009, poslední revize 9.5.2009  
Dostupné z:< <http://www.terapol.cz/nerezoveoceli.php> >
- [13] KADLEC, K. *Přehled snímačů hladiny*, [on line], 2009, poslední revize 14.5.2009  
Dostupné z:< [http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/MT\\_INaRP/A05\\_0607\\_Kadlec.pdf](http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/MT_INaRP/A05_0607_Kadlec.pdf) >
- [14] Kupka, T. - Hejhálková, H.: *Koňářík- ucelený systém pro upevňování potrubí* [on line], 2009, poslední revize 22.5.2009  
Dostupné z:< <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/konarik-system-pro-upevnovani-potrubí/> >

- [15] BOJKO, M.: *Návody do cvičení "Modelování proudění" - FLUENT*, VŠB-TU Ostrava, fakulta strojní - katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, Ostrava, 2008
- [16] ŠTIGLER, J.: *Optimální rozdělení mapované sítě na kruhu*, VUT-FSI Brno, fakulta strojního inženýrství - Energetický ústav, Brno, 2001
- [17] FÍŘT, J.: *Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 8/2008 ze dne 18. listopadu 2008*, [on line], 2009, poslední revize 22.5.2009  
Dostupné z: < [http://www.eru.cz/user\\_data/files/cenova%20rozhodnuti/CR%20elektro/OZ/CR\\_8-2008\\_OZE-KVET-DZ.pdf](http://www.eru.cz/user_data/files/cenova%20rozhodnuti/CR%20elektro/OZ/CR_8-2008_OZE-KVET-DZ.pdf)
- [18] ŠOB, F.: *Hydromechanika*, VUT - FSI Brno, nakladatelství CERM, Brno 2002

Další zdroje na internetu:

Oficiální prospekt snímače LMK 351:

[http://www.bdsensors.cz/download/datasheet\\_lmk\\_351\\_cs\\_021.pdf](http://www.bdsensors.cz/download/datasheet_lmk_351_cs_021.pdf)

Oficiální stránky přepadového stavítka:

[http://www.vhs-kral.cz/katalog/zlabova\\_stavitka/](http://www.vhs-kral.cz/katalog/zlabova_stavitka/)

Oficiální stránky stavítka přívodu k vodnímu kolu:

<http://www.jmahod.cz/katalog-vyroby/armatury-pro-odpadni-vody/eri-stavitko-z-korozivzdorne-oceli-do-drazky-ve-zlabu-do-zlabu-nebo-pred-zlab/popis/>

Oficiální stránky šoupátka se servomotorem:

<http://www.jmahod.cz/katalog-vyroby/armatury-pro-odpadni-vody/mono-deskove-uzaviraci-soupatko-pn-10-meziprurubove-s-el-servomotorem/popis/>

Oficiální stránky kotevních stojanů:

<http://www.konarik.cz/cz/produkty/potrubni-dily/stojany-kotevni/>

Oficiální stránky ručně stíraných česlí:

<http://www.fontanar.cz/czech.html>

Oficiální stránky uložení roštů:

[http://www.perfolinea.cz/index.php?lang=cz&sekce=2&page=ocro\\_ulozeni](http://www.perfolinea.cz/index.php?lang=cz&sekce=2&page=ocro_ulozeni)

Oficiální stránky generátoru:

[http://www1.siemens.cz/ad/current/index.php?ctxnh=e827132a1d&ctxp=info\\_novinky&page=2&msite=file\\_details&fnh=031908e542&PHPSESSID=5f3d4563d20536471b3577c1a2bc58f](http://www1.siemens.cz/ad/current/index.php?ctxnh=e827132a1d&ctxp=info_novinky&page=2&msite=file_details&fnh=031908e542&PHPSESSID=5f3d4563d20536471b3577c1a2bc58f)

Oficiální stránky křesťanské organizace A Rocha:

[www.jarojaromer.cz/?page\\_id=71](http://www.jarojaromer.cz/?page_id=71)

[www.mapy.cz](http://www.mapy.cz)

[www.ferona.cz](http://www.ferona.cz)

## 10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Symbol	Jednotka	Popis
$b$	[m]	šířka přivaděče
$b_{\check{c}}$	[m]	velikost průlin česlí
$b_p$	[m]	šířka vstupního průřezu přívodu k vodnímu kolu
$C$	[Kč/MWh]	výkupní ceny elektřiny dodané do sítě
$C_{G-K}$	[-]	rychlostní koeficient dle Ganquillet – Kuttera
$D$	[m]	průměr turbíny pro variantu B
$D_{min}$	[m]	minimální vnější průměr vodního kola
$D_P$	[m]	průměr turbíny pro variantu A
$D_{VK}$	[m]	vnější průměr vodního kola
$D_2$	[m]	průměr turbíny pro variantu C
$d_h$	[m]	charakteristický rozměr
$E_{CA}$	[MWh/rok]	množství el.energie vyrobené za rok pro variantu A
$E_{CB}$	[MWh/rok]	množství el.energie vyrobené za rok pro variantu B
$E_{CC}$	[MWh/rok]	množství el.energie vyrobené za rok pro variantu C
$g$	[m·s <sup>-2</sup> ]	tíhové zrychlení
$H$	[m]	čistý spád
$H_B$	[m]	hrubý spád
$H_{\check{c}b}$	[m]	ztráta v česlích, vyjádřená výškou
$H_{Z\ 1,2}$	[m]	ztráta mezi body 1 a 2 systému, vyjádřená výškou
$h$	[m]	naměřená přepadová výška
$h_h$	[m]	výška hladiny v nádrži
$h_p$	[m]	výška hladiny ve vstupním průřezu přívodu k vod. kolu
$h_{Pf}$	[m]	výška přepadové desky stavítka
$h_{Pf0}$	[m]	zvolená výška přepadové desky při první iteraci
$h_s$	[m]	výška hladiny v přívodu při optimálním průtoku
$h_0$	[m]	zvolená výška hladiny při první iteraci
$h_1$	[m]	výška středu průřezu v bodě 1
$h_2$	[m]	výška středu průřezu v bodě 2
$I$	[Kč]	vložené investice do projektu
$i_0$	[%]	poměrný spád přívodu (kanálu)
$L$	[m]	délka sací trouby
$L_{\check{c}}$	[m]	délka česlic
$n$	[-]	součinitel drsnosti
$n_h$	[h/rok]	doba provozu turbíny v roce
$n_{k2}$	[ot.·min. <sup>-1</sup> ]	otáčky turbíny pro variantu C s uvažováním skluzu
$n_{MS}$	[ot.·min. <sup>-1</sup> ]	otáčky generátoru
$n_P$	[ot.·min. <sup>-1</sup> ]	nadsynchronní otáčky generátoru
$n_T$	[ot.·min. <sup>-1</sup> ]	otáčky turbíny pro variantu B
$n_{Tk}$	[ot.·min. <sup>-1</sup> ]	otáčky turbíny pro variantu B s uvažováním skluzu
$n_s$	[ot.·min. <sup>-1</sup> ]	specifické otáčky
$n_2$	[ot.·min. <sup>-1</sup> ]	otáčky turbíny pro variantu C
$n_{11}$	[ot.·min. <sup>-1</sup> ]	jmenovité otáčky
$O$	[m]	omočený obvod kanálu
$P$	[W]	výkon turbíny pro variantu A
$P_B$	[W]	výkon turbíny pro variantu B



$P_C$	[W]	výkon turbíny pro variantu C
$P_{th}$	[W]	teoretický výkon
$p_h$	[Pa]	hydrostatický tlak měřený snímačem hladiny
$p_K$	[m]	koeficient vlivu konstrukčních prvků
$p_1$	[Pa]	tlak na vstupu do oblasti řešeného proudění
$p_2$	[Pa]	tlak na výstupu z oblasti řešeného proudění
$Q$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	průtok v přívodu při měření h na lokalitě
$Q_{EVS}$	[-]	hodnotící kritérium kvality sítě
$Q_{G-K}$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	průtok v přívodu podle Ganquillet – Kuttera
$Q_{op}$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	optimální průtok v přivaděči
$Q_{op2}$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	optimální průtok pro variantu C
$Q_P$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	optimální průtok pro turbínu varianty A
$Q_{Pk}$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	průtok v přívodu k vodnímu kolu
$Q_{Př}$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	průtok, kdy je dosažena horní hrana přepadové desky
$Q_{11}$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	jmenovitý průtok
$R$	[m]	hydraulický poloměr
$Re$	[-]	Reynoldsovo číslo
$S$	[m <sup>2</sup> ]	plocha průřezu kapaliny v přívodu pro přepadací výšku h
$S_e$	[m <sup>3</sup> ]	objem elementu u 3 D
$S_{eq}$	[m <sup>3</sup> ]	maximální objem prvku
$S_{op}$	[m <sup>2</sup> ]	plocha průřezu kapaliny v přívodu při optim. průtoku $Q_{op}$
$S_{Pk}$	[m <sup>2</sup> ]	plocha průřezu kapaliny v přívodu k vodnímu kolu
$S_3$	[m <sup>2</sup> ]	plocha počátečního průřezu savky
$S_4$	[m <sup>2</sup> ]	plocha koncového průřezu savky
$s$	[m]	šířka česlic
$T_A$	[rok]	návratnost vložených investic pro variantu A
$T_B$	[rok]	návratnost vložených investic pro variantu B
$T_C$	[rok]	návratnost vložených investic pro variantu C
$t$	[s]	čas dopadu kapaliny
$t_1$	[s]	první kořen kvadratické rovnice
$t_2$	[s]	druhý kořen kvadratické rovnice
$u_1$	[m]	obvodová rychlost na vstupu do oběžného kola turbíny
$u_2$	[m]	obvodová rychlost na výstupu z oběžného kola turbíny
$v$	[m·s <sup>-1</sup> ]	velikost rychlosti dopadající kapaliny
$v_{G-K}$	[m·s <sup>-1</sup> ]	rychlost v přívodu podle Ganquillet – Kuttera
$v_L$	[m·s <sup>-1</sup> ]	střední rychlost ve vyvinutém laminárním profilu
$v_{LX}$	[m·s <sup>-1</sup> ]	velikost rychlosti ve směru souřadnice x
$v_{LM}$	[m·s <sup>-1</sup> ]	velikost rychlosti v daném průřezu
$v_{Pk}$	[m·s <sup>-1</sup> ]	rychlost v přívodu k vodnímu kolu
$v_S$	[m·s <sup>-1</sup> ]	střední velikost rychlosti, určená z průtoku
$v_{u1}$	[m·s <sup>-1</sup> ]	obvodová složka absolutní rychlosti na vstupu
$v_{u2}$	[m·s <sup>-1</sup> ]	obvodová složka absolutní rychlosti na výstup
$v_x$	[m·s <sup>-1</sup> ]	rychlost dopadající kapaliny ve směru x
$v_y$	[m·s <sup>-1</sup> ]	rychlost dopadající kapaliny ve směru y
$v_1$	[m·s <sup>-1</sup> ]	střední rychlost v přívodu při optimálním průtoku
$v_2$	[m·s <sup>-1</sup> ]	střední rychlost v průřezu před turbínou
$v_4$	[m·s <sup>-1</sup> ]	střední rychlost na výstupu ze savky
$x$	[m]	vzdálenost dopadu kapaliny ve směru x
$Y_{ZČ}$	[J·kg <sup>-1</sup> ]	ztrátová měrná energie na česlích

$Y_{Z\ 1,2}$	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}]$	ztrátová měrná energie mezi body 1 a 2
$y$	$[\text{m}]$	vzdálenost dopadu kapaliny ve směru $y$
$y_0$	$[\text{m}]$	počáteční vzdálenost ve směru $y$
$Z_{\text{EA}}$	$[\text{Kč/rok}]$	zisk z vyrobené el. energie pro variantu A
$Z_{\text{EB}}$	$[\text{Kč/rok}]$	zisk z vyrobené el. energie pro variantu B
$Z_{\text{EC}}$	$[\text{Kč/rok}]$	zisk z vyrobené el. energie pro variantu C
$z_1$	$[\text{m}]$	vzdálenost od hladiny k výtok. otvoru pro obd. přepad
$z_2$	$[\text{m}]$	vzdálenost od hladiny k přepadové hraně pro obd. přepad
$z_3$	$[\text{m}]$	výška přepadové desky pro teorii obdélníkového přepadu
$\alpha$	$[-]$	Coriolisovo číslo
$\alpha_{\text{č}}$	$[\text{°}]$	sklon česlí
$\alpha_1$	$[-]$	Coriolisovo číslo na vstupu do oblasti řešeného proudění
$\alpha_4$	$[-]$	Coriolisovo číslo na výstupu z oblasti řešeného proudění
$\beta_{\text{B}}$	$[-]$	Berezinského koeficient
$\eta_{\text{C}}$	$[\%]$	celková účinnost
$\eta_{\text{h}}$	$[\%]$	hydraulická účinnost
$\mu$	$[-]$	výtokový součinitel
$\nu$	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$	kinematická viskozita
$\xi_{\text{čb}}$	$[-]$	ztráta na česlích
$\rho$	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	hustota vody

## 11 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – střední hodnoty denních průtoků v období od 7.10.2008 do 5.5.2009

Příloha 2 – výsledky iteračních kroků při určování výšky hladiny v přívodu při  $Q_{op}$  a výsledky iteračních kroků při určování výšky přepadové desky  $h_{pf}$

Příloha 3 – hodnoty Berezinského součinitele pro různé tvary česlic

Příloha 4 – sestava MVE

Příloha 5 – sestava nádrže

Příloha 6 – sestava přívodu a přepadu

Příloha 7 – sestava potrubí

Příloha 8 – stavební úpravy